

УДК 621.928.4

BEST PRACTICES AND TECHNICAL SOLUTIONS FOR REDUCING ENERGY CONSUMPTION DURING OPERATION OF CENTRIFUGAL SEPARATORS

O. Gavva¹, A. Chupryna², O. Chepeliuk¹, L. Martsynkevych¹¹National University of Food Technologies²DE "GEA Ukraine"

Key words:

centrifugal separator,
energy losses,
drive efficiency,
direct drive,
intelligent control,
food product

Article history:

Received 27.11.2024

Received in revised form
28.11.2024

Accepted 15.12.2024

Corresponding author:

martsinkevich.lesya@gmail.com

ABSTRACT

Main groups of energy consumption in centrifugal separators were analyzed, as well as methods and technical solutions from leading manufacturers of centrifugal separators for energy consumption reduction in processes of clarification/separation of liquid food products. During operation of centrifugal separators there are energy consumption contributors as the following: mechanical losses in the drive, electrical losses in the motor, energy consumption for hydraulic friction in the bowl, windage (air friction of the bowl) and energy consumption for product feed and discharge. Utilization of frequency inverters for separator drive control helped to simplify drive design and control but also reduced energy consumption. Changing from gear to belt drive offered considerable drive efficiency increase from 75—80% to 90%. Further implementation of integrated direct drive controlled with frequency converter allows to increase separator's drive efficiency to 93—95%. Optimization of impeller geometry of centripetal pumps for discharge of separated product allows to reduce the hydraulic friction losses in open-type separators with reduction in total energy consumption by 10%. Biggest energy losses in centrifugal separators are induced by air friction of the bowl. There are several technical solutions suggested for reducing air friction: creating vacuum in the bowl chamber or reducing the bowl rotation speed due to a decrease in the separator's capacity. Such solutions can help to save up to 40% of total energy consumption. Additional potential in reducing energy consumption and losses of other resources, such as water for operating the separator, as well as product losses reduction has implementation of intelligent centrifuge control. As examples: bowl speed control depending on product feed capacity or changed separation efficiency requirements; solids discharge control depending on separated product turbidity, etc. However, this requires separate research on each individual technological process and even at each enterprise with their unique production conditions.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-12

КРАЩІ ПРАКТИКИ І ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ПІД ЧАС РОБОТИ ВІДЦЕНТРОВИХ СЕПАРАТОРІВ

О. М. Гавва¹, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0003-2938-0230

А. В. Чуприна², канд. техн. наук

О. М. Чепелюк¹, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-6295-6305

Л. В. Марцинкевич¹, ORCID ID: 0000-0003-2215-9912

¹Національний університет харчових технологій

²ДП «ГЕА Україна»

У статті досліджено найбільш значимі групи витрат енергії у відцентрових сепараторах, а також методи і технічні рішення для їх зниження. Використання прямого інтегрованого приводу з управлінням від перетворювача частоти дає змогу підвищити ККД приводу до 93—95%, оптимізація геометрії крильчатки доцентрових насосів для вивантаження сепарованого продукту — зменшити споживання енергії на 10%, а технічні рішення для зниження тертя барабана об повітря — заощадити до 40% загальних витрат енергії. Додатковий потенціал у зниженні витрат енергії і інших ресурсів має впровадження інтелектуального управління обладнанням.

Ключові слова: відцентровий сепаратор, барабан, витрати енергії, ККД, прямий привід, інтелектуальне управління, харчовий продукт.

Вступ. Окрім того, що відцентрові сепаратори для очищення/розділення рідких харчових продуктів є технічно складним і дороговартісним обладнанням, вони також відносяться до обладнання з високим питомим споживанням електричної енергії на тонну обробленого продукту. Стрімке зростання тарифів, а інколи й дефіцит електроенергії порушує питання енергетичної ефективності всього обладнання загалом і відцентрових сепараторів зокрема. З часу винаходу відцентрового сепаратора для знежирення молока у XIX сторіччі постійно вдосконалювалась як конструкція робочого органу (барабана), так і приводу сепаратора. Однак незмінним залишається принцип роботи сепаратора: для ефективного розділення рідин/осаду різної густини відцентрова сила повинна в тисячі разів перевищувати силу тяжіння.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Для опису процесу відділення механічних домішок з рідин у центрифугах (технологічні процеси освітлення, кларифікації) використовується закон Стокса, оскільки розмір частинок осаду не великий, а структура їх потоку у відцентровому полі сепаратора, як правило, знаходиться в діапазоні низьких чисел Рейнольдса, тобто їх потік є ламінарним. Згідно з [1] швидкість осадження частинки:

$$V_z = \frac{D^2 \Delta \rho}{18 \eta} r \omega^2, \quad (1)$$

де V_z — швидкість осадження твердих частинок; D — діаметр частинки; $\Delta \rho$ — різниця густини між матеріалом частинки та рідиною; η — динамічна в'язкість рідини; $r\omega^2$ — відцентрове прискорення частинки під час обертання в барабані сепаратора.

Коефіцієнт сепарації відображає, у скільки разів відцентрове прискорення у центрифугі перевищує прискорення вільного падіння:

$$\zeta = r\omega^2/g. \quad (2)$$

Для ефективного процесу очищення рідини швидкість осадження V_z повинна бути більшою або рівною ефективній швидкості рідини в сепараторі:

$$V_e = Q/S, \quad (3)$$

де Q — об'єм рідини, що проходить через барабан за одиницю часу; S — ефективна площа очищення в барабані сепаратора.

Отже,

$$V_z = V_e = Q/S = \frac{D^2 \Delta \rho}{18 \eta} r \omega^2. \quad (4)$$

З цього рівняння визначається мінімальний розмір частинки, яку можна відділити у відцентровому полі барабана сепаратора з ефективною площею освітлення S та з продуктивністю освітлення Q :

$$D_{min} = \sqrt{\frac{18 \eta}{\Delta \rho} \cdot \frac{1}{g} \cdot \frac{Q}{S \zeta}}, \quad (5)$$

або визначити ефективну продуктивність сепаратора із заданими параметрами барабана та параметрами продукту:

$$Q_e = \frac{D^2 \Delta \rho}{18 \eta} g \zeta S. \quad (6)$$

Добуток коефіцієнта сепарації та ефективної площі освітлення утворює еквівалентну поверхню очищення:

$$S_\zeta = \zeta S, \quad (7)$$

який відображає площу поверхні ємкості, що забезпечить таку саму ефективність очищення, як і в сепараторі, але під дією сили тяжіння, та який може служити критерієм для порівняння ефективності розділення у відцентрових сепараторах.

З огляду на формулу (7) для підвищення ефективності розділення у відцентрових центрифугах потрібно підвищувати коефіцієнт сепарації та ефективну площу очищення. Максимальна швидкість обертання та радіус робочого органу центрифуги — ротора, обмежуються міцністю матеріалу, що використовується для його виготовлення. Час осідання частинки залежить від швидкості осідання V_z та від товщини шару рідини, який частинка має пройти до осідання. Відповідно, для забезпечення максимальної ефективної площі очищення товщина шару рідини в полі відцентрових сил повинна бути мінімальною. Так більша швидкість барабана забезпечується у центрифугах трубчастої конструкції (рис. 1, а). Коефіцієнт сепарації ζ в них складає 13000—17000 [1].

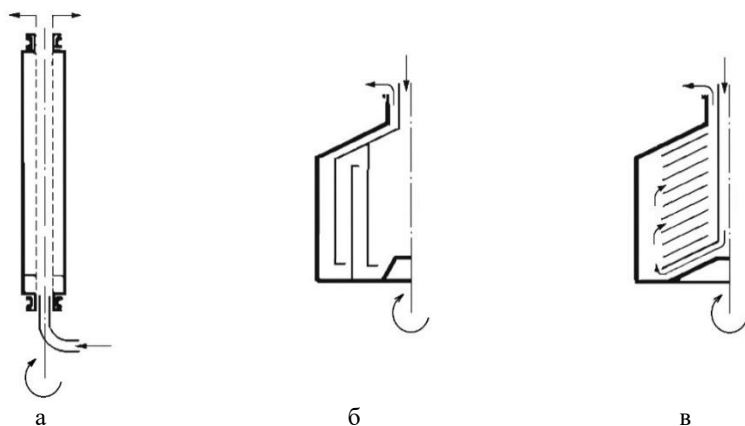


Рис. 1. Схеми роторів центрифуг різних типів:

а — трубчастої; б — барабан камерного типу; в — барабан із пакетом тарілок

Однак радіус ротора та ефективна площа очищення в трубчастих центрифугах незначні і суттєво знижують їх еквівалентну поверхню очищення.

Для очищення харчових рідин переважно використовують сепаратори-центрифуги, робочим органом яких є барабан. При більшому радіусі барабана швидкість обертання барабана в них, якщо порівняти з трубчастими центрифугами, менша. Коефіцієнт сепарації ζ в таких сепараторах складає 5000—13000 [1]. Однак ефективна площа очищення в сепараторів у десятки, а в деяких випадках у сотні разів вища.

Виділяють два типи барабанів сепараторів: камерної конструкції (рис. 1, б) та барабани з пакетом тарілок (рис. 1, в).

Камерні барабани мають простішу конструкцію, а тому дешевші у виготовленні. Підвищена ефективна площа очищення в таких барабанах забезпечується набором циліндричних вставок, що утворюють окремі камери в барабані та на яких під дією відцентрової сили осідають тверді частинки. Недоліком такої конструкції є неможливість автоматизації процедури очищення вставок від осаду, тому такі сепаратори мають періодичний принцип дії, а видалення осаду зі вставок виконується вручну. Ручне розбирання барабана, а також ручне видалення циліндричних вставок для очищення обмежують кількість камер (у середньому 2—6) та, відповідно, є лімітуючим фактором для збільшення ефективної площі очищення.

У барабанах з пакетом тарілок тарілки мають конічну форму та спресовуються в пакеті із зазором у частку міліметра. Кількість тарілок у пакеті може сягати кількох сотень. Рідина проходить через пакет тарілок тонкими шарами. Тверді частинки осідають на внутрішній поверхні тарілок та під дією відцентрової сили зісковзують на периферію барабана, де накопичуються в окремому просторі для осаду. Перевагою конструкції сепараторів із пакетом тарілок є те, що з'являється можливість автоматично вивантажувати осад через порти, розташовані по периметру барабана. Саме тому відцентрові сепаратори з пакетом тарілок знайшли найширше застосування у промисловому очищенні/розділенні рідин [2, 3].

Максимальна допустима швидкість обертання барабана для сепараторів з барабаном діаметром до 300 мм складає близько 11000 об/хв, для сепараторів з барабаном діаметром 800 мм і більше — 4500 об/хв [5, 6]. Враховуючи масу барабана сепаратора та необхідність прискорити рух продукту до швидкості обертання барабана, питома витрата енергії на оброблення продукту для більшості сепараторів складає від 1 до 1,4 кВт·год/м³ [7].

Мета дослідження: визначити та обґрунтувати найбільш значимі групи витрат енергії під час роботи відцентрових сепараторів із пакетом тарілок і дослідити можливість їх зменшення.

Результати дослідження. Витрати енергії в процесі розділення харчових продуктів на відцентрових сепараторах передбачають такі складові [5]:

$$P = P_{\text{мех}} + P_{\text{ел}} + P_{\text{гидр}} + P_{\text{нов}} + P_{\text{нас}}, \quad (8)$$

де P — загальні витрати енергії під час роботи сепаратора; $P_{\text{мех}}$ — витрати енергії в механічному приводі; $P_{\text{ел}}$ — електричні витрати енергії в приводі сепаратора; $P_{\text{гидр}}$ — витрати енергії на гідравлічне тертя рідини в барабані сепаратора; $P_{\text{нов}}$ — витрати енергії на тертя барабана об повітря; $P_{\text{нас}}$ — витрати енергії на подачу продукту на сепаратор.

Залежно від того, якою є конструкція сепаратора: герметичною (рис. 2, а) чи відкритою (рис. 2, б), величини $P_{\text{гидр}}$ та $P_{\text{нас}}$ розподіляються за різними залежностями. В герметичних сепараторах насос подачі продукту в сепаратор повинен як безпосередньо подавати продукт у сепаратор, так і прокачати через нього, забезпечивши також

потрібний тиск подачі на подальшу переробку. Тому такий насос повинен забезпечити тиск подачі близько 4—6 атмосфер. $P_{\text{зідр}}$ у таких сепараторах — це, власне, втрати на гідравлічне тертя під час розгону продукту в барабані та під час його вивантаження з барабана. В сепараторах відкритої конструкції насос подачі повинен забезпечити неперервне надходження продукту в барабан сепаратора, для чого достатньо забезпечити тиск 0,5—1 атмосфер. Однак для вивантаження продукту із сепаратора під тиском у такій конструкції використовується доцентровий насос, у якому кінетична енергія рідини, що обертається, перетворюється на потенціальну енергію тиску вивантаження. Ці витрати враховуються у величині $P_{\text{зідр}}$. Саме тому для об'єктивного порівняння витрат енергії в процесі розділення харчових продуктів на відцентрових сепараторах рекомендується враховувати споживання енергії насосом подачі продукту.

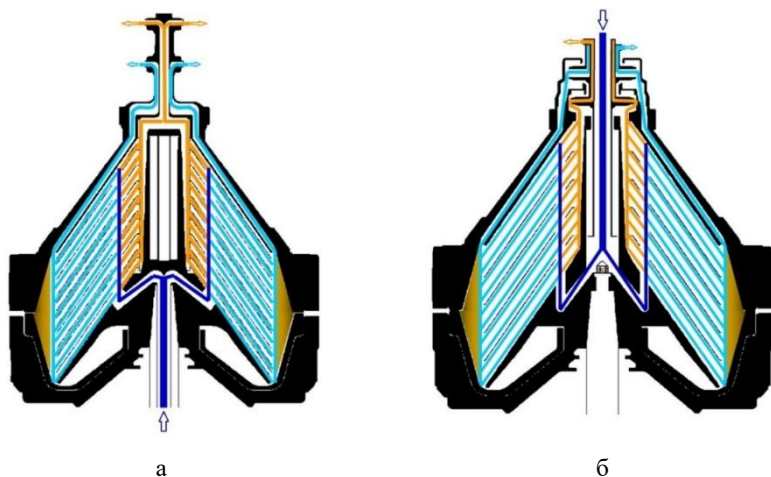


Рис. 2. Переріз барабана сепаратора:

а — герметичної конструкції; б — відкритої (гідрогерметичної) конструкції

У праці [7] досліджувались витрати енергії та методики їх зниження для сепаратора-кларифікатора 18-ї серії компанії Alfa Laval. Досліджуваний сепаратор мав продуктивність 160 м³/год. Оскільки цей сепаратор має герметичну конструкцію, розподілення витрат суттєво відрізняється від відкритих моделей: витрати на гідравлічну енергію — 41%; на тертя барабана об повітря — 39%; механічні втрати — 15%; електричні втрати — 5%. Однак треба відзначити, що для ефективної роботи сепаратора герметичної конструкції потрібно використовувати потужний насос зі споживанням енергії приблизно 54% від загальної енергії, що використовується сепаратором.

При дослідженнях [8] сепаратора відкритої конструкції, що використовується для знежирення молока продуктивністю до 26000 л/год (тип Maxsteam 30T, виробник — компанія Haus) були отримані такі дані: 49% енергії споживається на прискорення продукту до швидкості обертання барабана, 32% — на подолання тертя поверхні барабана об повітря, 10% — електричні втрати; 9% — механічні втрати.

Втрати енергії можна поділити на втрати у приводі та втрати у робочому органі — барабані сепаратора.

Втрати енергії у приводі. За більш ніж сторічну історію відцентрових сепараторів використовувались різноманітні конструкції приводів: від ручного приводу з ланцюговим мультиплікатором і парового двигуна з пасовими передачами до інтегрованого прямого приводу. Із середини минулого сторіччя і до 1990-х років найбільшою

популярністю користувався привід з електродвигуном, муфтою та черв'ячним мультиплікатором. Наприкінці минулого сторіччя з удосконаленням плоскопасової передачі виробники почали переводити сепаратори на використання плоскопасового приводу. Близько 15 років тому почалось активне впровадження прямого приводу.

Компанія GEA Westfalia Separator провела дослідження коефіцієнта корисної дії приводів різної конструкції на сепараторах власного виробництва [9].

Так сумарний коефіцієнт корисної дії приводу з електродвигуном, муфтою та черв'ячним мультиплікатором складає:

$$KKД_{np} = KKД_{\partial\partial} \cdot KKД_m \cdot KKД_{ред} = 0,93 \cdot 0,97 \cdot 0,85 = 0,76, \quad (9)$$

де $KKД_{np}$ — коефіцієнт корисної дії приводу; $KKД_{\partial\partial}$ — коефіцієнт корисної дії електродвигуна; $KKД_m$ — коефіцієнт корисної дії муфти; $KKД_{ред}$ — коефіцієнт корисної дії черв'ячного мультиплікатора.

У сучасних сепараторах із найдосконалішою конструкцією черв'ячного мультиплікатора $KKД_{ред}$ не перевищує 0,8.

Сумарний коефіцієнт корисної дії приводу з плоскопасовою передачею складає:

$$KKД_{np} = KKД_{\partial\partial} \cdot KKД_{nn} = 0,93 \cdot 0,97 = 0,9. \quad (10)$$

Оскільки відсутні втрати енергії у муфті та передачах, коефіцієнт корисної дії прямого інтегрованого приводу складає:

$$KKД_{np} = KKД_{\partial\partial} = 0,93. \quad (11)$$

Впровадження прямого інтегрованого приводу стало можливим завдяки розробці електричних двигунів спеціальної конструкції та використанню перетворювачів частоти спеціальних серій. Вже, власне, саме застосування перетворювача частоти для управління електричним двигуном сепаратора забезпечує економію електричної енергії [10]. У дослідженні [9] було порівняно витрати енергії у приводі сепаратора для знежирення молока продуктивністю 10000 л/год, тип Есосгеат, обладнаного пускачем двигуна з перемиканням із зірки на трикутник, та сепаратора того ж типу, але обладнаного перетворювачем частоти для управління двигуном. На обох сепараторах було встановлено асинхронний двигун змінного струму номінальною потужністю 15 кВт. Незважаючи на те, що під час роботи приводу перетворювач частоти сам споживає 300 Вт (номінальна потужність при використанні пускача 12,5 кВт, та 12,8 кВт при використанні перетворювача частоти), за рахунок коригування зсуву фаз — коригування коефіцієнта потужності, фактичне споживання з використанням перетворювача частоти на 2,0 кВА нижче (14,9 кВА проти 12,9 кВА відповідно). Окрім цього, використання перетворювачів частоти дає змогу згладити пускові навантаження, а під час зупинки сепаратора — перевести двигун у генераторний режим.

Застосування перетворювача частоти дає змогу гнучко реагувати на зміну вимог технологічного процесу регулюванням швидкості обертання сепаратора із заощадженням електричної енергії. Зниження продуктивності сепаратора та/або пом'якшення вимог до ефективності сепарації (залишкового жиру у знежиреному молоці) знижує оберти барабана і, відповідно, споживання електричної енергії. Так, для тієї ж моделі сепаратора Есосгеат було отримано дані, наведені на рис. 3 та рис. 4.

Враховуючи отриманий коефіцієнт корисної дії прямого інтегрованого приводу сепаратора з перетворювачем частоти величиною 0,93, подальше зниження витрат електричної енергії в приводі можливе тільки завдяки удосконаленню конструкції електричного двигуна. Так, використання для сепараторів з прямим інтегрованим приводом електричного двигуна класу ІЕ4 замість електричного двигуна класу ІЕ2 може підвищити коефіцієнт корисної дії всього приводу до 0,95 [12].

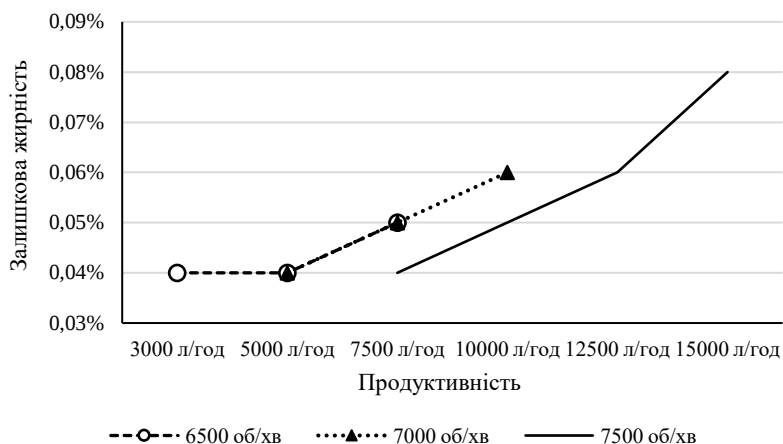


Рис. 3. Залежність залишкової жирності молока від продуктивності подачі та швидкості обертання барабана відцентрового сепаратора Есосреат для знежирення молока

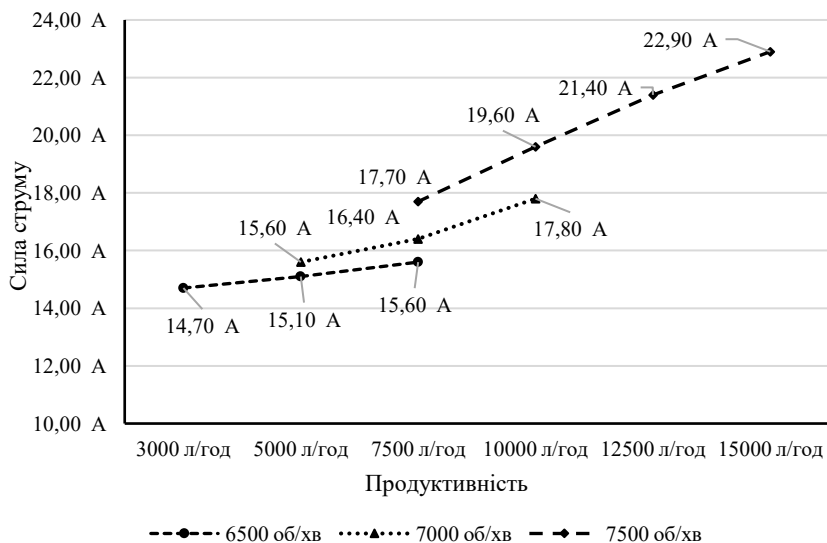


Рис. 4. Залежність сили струму на обмотках двигуна від продуктивності подачі та швидкості обертання барабана відцентрового сепаратора Есосреат для знежирення молока

Втрати енергії в барабані. При дослідженні витрат електричної енергії в барабані сепаратора для знежирення молока продуктивністю 30000 л/год, тип MSI 180-01-772 [11], було виділено три основні види витрат: на гідравлічну енергію — 16 кВт (48,5% від загальних витрат); на тертя барабана об повітря — 12 кВт (36%); на гідравлічне тертя у грейферах доцентрових насосів для вивантаження знежиреного молока і вершків під тиском — 3 кВт (9%).

Гідравлічна енергія використовується на виконання корисної роботи: прискорення рідини до швидкості обертання барабана — сепарації — вивантаження розділеного продукту із сепаратора під тиском. А тертя барабана об повітря і гідравлічне тертя у грейферах доцентрових насосів — це втрати, які потрібно мінімізувати.

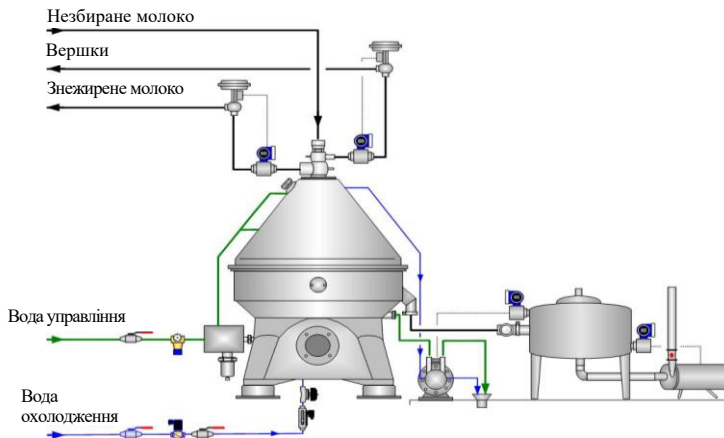


Рис. 5. Схема обв'язки сепаратора з вакуум-системою

Для зменшення втрат унаслідок тертя барабана об повітря в сепараторах Alfa Laval, а також в сепараторах GEA Westfalia Separator з найбільшими діаметрами барабана внутрішній простір сепаратора між барабаном і корпусом з кришкою герметизується і в ньому створюється розрідження з абсолютним тиском 0,32—0,5 бара (рис. 3). Так, у дослідженні [7] зниження абсолютного тиску в зоні навколо барабана сепаратора Alfa Laval до 0,26 бара забезпечило зниження загальних витрат енергії майже на 40%. Зменшення витрат енергії при зниженні абсолютного тиску в зоні навколо барабанів сепараторів GEA Westfalia Separator до 0,5 бара було визначено у дослідженні [11] та наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Зниження споживаної потужності в сепараторах GEA Westfalia Separator при створенні розрідження 0,5 бара в зоні навколо барабана сепаратора

Діаметр барабана, мм	Швидкість барабана, об/хв	Зниження потужності, кВт
730	5300	8,5
810	4800	12,6
1000	3900	19,4

У [8] наведено результати досліджень впливу діаметра грейферів доцентрових насосів сепараторів відкритої конструкції на відсоток використання гідравлічної енергії у вигляді корисного тиску продукту на виході сепаратора. Так, для сепаратора для знежирення молока продуктивністю до 26000 л/год (тип Maxcream 30T, виробник — компанія Haus) за умови використання як доцентрового насоса для знежиреного молока грейфера діаметром 150 мм з шістьма каналами і тиску вивантаження 4 бари частка використаної енергії для вивантаження знежиреного молока із сепаратора склала 20%.

У дослідженні [11], завдяки використанню спеціалізованого програмного середовища для розрахунку геометричних параметрів грейфера, було спроектовано доцентровий насос, у якому відсутня турбулентність, а гідравлічне тертя практично відсутнє. Це знизило витрати енергії у барабані сепаратора на 10%.

У статті [7] досліджувались втрати гідравлічної енергії в сепараторах Alfa Laval герметичної конструкції. У герметичній конструкції патрубки подачі (знизу барабана) і вивантаження продукту (зверху) повинні знаходитись на осі обертання барабана.

Таке технічне рішення забезпечує повернення системі енергії обертання рідини, що потрапила через нижній осьовий патрубок у барабан, прискорила до швидкості обертання у пакеті тарілок та була вивантажена з барабана сепаратора через верхній осьовий патрубок.

У сепараторах з гідрогерметичною конструкцією барабана зменшити витрати гідравлічної енергії можна завдяки зниженню швидкості обертання барабана. В такому випадку знижується тиск вивантаження продукту. Однак зниження швидкості також погіршує ефективність розділення в сепараторі, оскільки знижується відцентрова сила. Для компенсації зниження ефективності сепарації у дослідженні [11] пропонується збільшити час перебування продукту у полі відцентрових сил і збільшити ефективну площу сепарації — площу поверхні сепараційних тарілок. Тобто пропонується при підборі відцентрового сепаратора обирати наступний більший типорозмір і знизити швидкість обертання його барабана. Таке рішення не тільки знижує витрати гідравлічної енергії, але суттєво знижує втрати на тертя об повітря та гідравлічне тертя в грейфері. Приклад такого підбору наведений у табл. 2.

Таблиця 2. Зниження споживаної потужності в приводі сепаратора для знежирення молока за умови використання моделі з більшим діаметром барабана

Діаметр барабана, мм	540	660
Швидкість барабана, об/хв	7200	4700
Продуктивність сепарації, м ³ /год	25	25
Тиск вивантаження вершків, бари	8	3
Тиск вивантаження перегону, бари	5	4
Споживання енергії, кВт·год	27,7	16,9
Заощадження	—	39,1%

Інтелектуальне управління сепаратором. У багатьох технологічних процесах очищення/розділення харчових рідин можуть динамічно змінюватись умови, параметри процесу, рецептури тощо. Сучасні засоби автоматизації технологічних процесів дають змогу оперативно відстежувати такі зміни і інтелектуально управляти параметрами роботи сепаратора, знижуючи витрати енергії, втрати продукту та заощаджуючи інші ресурси [11, 13—17].

Так, у процесі очищення підсирної сироватки від сирного пилу безпосередньо після відділення її на сировиготовлювачі продуктивність подачі сироватки максимальна на початку її відбору. З часом потік поступово зменшується, збільшується час перебування продукту під дією відцентрових сил і для забезпечення потрібної ефективності очищення сироватки є можливість знизити швидкість обертання барабана сепаратора для зменшення витрат енергії.

У процесі виробництва нефільтрованого пива багато виробників продовжують роботу сепаратора на номінальній швидкості обертання барабана і досягають високої ефективності сепарації дріжджів. Для досягнення бажаного рівня мутності такого продукту в ефективно освітлене пиво такі виробники дозують не сепароване пиво, оминаючи сепаратор бай-пасом. З використанням приладів для вимірювання мутності продукту в потоці, встановлених у лінії подачі пива на сепаратор та лінії вивантаження пива з сепаратора, є можливість управляти швидкістю обертання барабана сепаратора для зменшення витрат енергії при досягненні бажаної ефективності сепарації (мутності пива).

Під час освітлення продуктів бродіння на сепараторі вміст дріжджів, зазвичай,

найвищий на початку викачування ферментаційної ємності і значно знижується під кінець викачування. У більшості відцентрових сепараторів вивантаження осаду управляється за таймером, а інтервали між вивантаженнями розраховуються, зважаючи на найнесприятливіші умови — концентрації дріжджів у продукті на початку процесу сепарації. Оскільки концентрація дріжджів з часом знижується, осад, який вивантажується через фіксовані проміжки часу, буде містити все менше дріжджів і все більше продукту. А це, з одного боку, невиправдано підвищує втрати продукту, що особливо важливо для продуктів з високою вартістю, як-от виноградне вино, а з іншого боку, підвищує витрати енергії в процесі сепарації. Під час кожного вивантаження осаду з сепаратора знижується швидкість обертання барабана і, відповідно, привід сепаратора збільшує споживання електричної енергії для досягнення заданої швидкості (під час вивантаження осаду сила струму на обмотках двигуна сепаратора може зростати на 10—30%). Сигналом для ініціації вивантаження осаду з барабана сепаратора може бути підвищення мутності продукту на виході сепаратора. Тому завдяки встановленню вимірювача мутності в лінії вивантаження продукту із сепаратора можна забезпечити інтелектуальне управління вивантаженнями осаду і зменшити таким чином витрати енергії, води, що використовується для управління вивантаженнями, та втрати продукту.

Крім того, параметри технологічного процесу можна оптимізувати для зниження витрат енергії. Так, оптимізація процесу концентрації плазми крові у центрифугі дає змогу знизити витрати енергії на 37% [18].

Під час підвищення рівня автоматизації технологічних процесів і застосування інтелектуального управління важливо забезпечити як виробництво, так і технологічний процес. Методи визначення стану та умов роботи відцентрового сепаратора з пакетом тарілок з вимірюванням вібрації в критичних точках були запропоновані у наукових працях [19, 20].

Висновки. З використанням конструкції прямого приводу, сучасних електродвигунів і перетворювачів частоти коефіцієнт корисної дії приводу відцентрових сепараторів підвищився до 0,93—0,95 і практично не залишає потенціалу для зменшення витрат у ньому. Водночас суттєвими залишаються втрати енергії на тертя барабана об повітря. Створення розрідження в зоні обертання барабана або зменшення частоти його обертання потенційно може знизити витрати енергії під час роботи сепаратора на 40%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Dr.-Ing. Heinz Hemfort. (1984). Separatoren Zentrifugen für Klär-, Trenn- und Extraktionsprozesse. *Technisch-wissenschaftliche Dokumentation*, 3. Veröffentlichung der WestfaliaSeparator AG.
2. Gaaseidnes, K., Turbeville, J. (1999). Separation of oil and water in oil spill recovery operations. *Pure Appl. Chem.*, 71(1), 95—101.
3. Tarleton, E. S. (2011). Equipment selection and process design for solid/liquid separation. IN: *Proceedings of Filtech 2011: International Conference and Exhibition for F&S Technology*, Wiesbaden, Germany, March 22nd-24th, 61—77.
4. Purchas, D. B., and Wakeman, R. J. (1986). *Solid/Liquid Separation Equipment Scale-up*. Uplands Press Ltd, London.
5. Malliaroudaki, M. I., Gomes, R. L., Ferrari, R., Watson, N. (2020). Modelling energy consumption in the dairy supply chain. Single and Multi-product Manufacturing and Distribution, Project: Predictive modelling tools to evaluate the effects of climate change on food safety, Horizon 2020 research and innovation programm under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 813329, EU, Ref. Ares(2020)7878745-22/12/2020.

6. Heymann, B. (2011). Plant and Equipment: Centrifuges and Separators — Types and Design. *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 2nd Edition, 166—174.
7. Szepešsy, S., Thorwid, P. (2018). Low Energy Consumption of High-Speed Centrifuges. *Chemical Engineering Technology*. DOI: 10.1115/1.2817488.
8. Sağlam, E. (2020). Power consumption reduction studies and analysis for centrifugal separator, M. Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Aydin Adnan Menderes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences Mechanical Engineering, 2020-M.Sc.-007.
9. GEA Westfalia Separator Group GmbH, R&D dpt. 2017. GEA Product Data.
10. Friso, D. (2017). Dynamic analysis of centrifugal separator in unsteady-state condition with and without variable-frequency drive. *Contemporary Engineering Sciences*, 10(2), 73—84.
11. GEA Westfalia Separator Group GmbH, R&D dpt. 2022. GEA Product Data.
12. Furuta, K., Kosuge, K., Kobayashi, K. (1988). Self-tuning, sliding mode, and adaptive control for direct drive motor. IEEE IECON '88 conference record, 459—165.
13. Dumitrescu, R., Kühn, A., Steffen, D., Thielemann, F. (2018). Entwicklung intelligenter technischer Systeme. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113(6), 420—425. <https://doi.org/10.3139/104.111937>.
14. Dumitrescu, R., Fleuter, M. (2019). *Intelligenter Separator: Optimale Veredelung von Lebensmitteln*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
15. Gausemeier, J., Tschirner, C., Dumitrescu, R. The path to intelligent technical systems. *Industry Management*, 29 (1), 49—52.
16. Tita, A., Mends, E., Hussaini, Sh., Thella, J., Smith, Y., Chu, P. (2024). Beneficiation of Li-bearing sedimentary claystone by centrifugation. *Minerals Engineering*, 218. 109042. 10.1016/j.mineng.2024.109042.
17. Batalović, V. (2011). Centrifugal separator, the new technical solution, application in mineral processing. *International Journal of Mineral Processing*, 100(3—4), 86—95. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.05.007>.
18. Sabri Salim, M., Malaysia, M. (2013). Optimization of Power Consumption for Centrifugation Process Based on Attenuation Measurements. *Journal of Physics: Conference Series*, 423, 012061. doi:10.1088/1742-6596/423/1/012061.
19. Merkelbach, S., Afroze, L., Janssen, N., von Enzberg, S., Kühn, A., and Dumitrescu, R. (2022). Using vibration data to classify conditions in disk stack separators. *Vibroengineering PROCEDIA*, 46, 21—26. <https://doi.org/10.21595/vp.2022.23000>.
20. Arnaut, A. (2021). *Centrifugal separator diagnosis*. M. Sc. Thesis, Rijeka: University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies. Retrieved from <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:187:957>.