

УДК 66.047

ЕНЕРГЕТИЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОВЕДЕННЯ ВИПАРЮВАННЯ ТА СУШІННЯ РІДИННИХ ПРОДУКТІВ В ЄДИНОМУ ВИПАРНО-СУШИЛЬНОМУ АГРЕГАТІ**Шморгун В.В.¹, канд. техн. наук, Мартюк О.В.²***Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. М. Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна*¹*провідний наук. співр., старший наук. співр. shmorgun@nas.gov.ua, <http://orcid.org/0000-0001-6303-7220>*²*молодший наук. співр., martiuk o76@gmail.com*<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.5>

Досліджено реальні енерговитратні показники технології суміщення випарювання та сушіння рідинних продуктів в єдиному агрегаті. Наведено результати апробації даної технології на прикладі роботи в промислових умовах агрегату "ИСПАР-700", розробленого в Інституті технічної теплофізики НАН України.

The energy consumption indicators of the technology of combining evaporation and drying of liquid products in a single unit were studied. The results of the approbation of this technology are presented on the example of the operation in industrial conditions of the "ИСПАР-700" unit, developed at the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Бібл. 5, табл. 1, рис. 1.

Ключові слова: розпилювальне сушіння, випарювання, випарно-сушильний агрегат, енерговитратні показники, аналіз енерговитрат.

В результаті суттєвого зростання цін на енергетичні ресурси виникли суттєві зміни в факторах, що впливають на собівартість кінцевої продукції. Загальною закономірністю стало суттєве зростання частки енергетичної складової в собівартості продукції. Також зросли платежі за використання водних ресурсів, більш прискіпливим стало питання контролю за шкідливими викидами виробництв в навколишнє середовище. В зв'язку з цим, все більший інтерес почав виявлятися до менш енерговитратних технологій, до розробок альтернативних, екологічно більш безпечних технологій та енерговитратних систем.

Виходячи з цього, виникає інтерес проаналізувати розроблену в Інституті технічної теплофізики (ІТТФ) НАН України та апробовану в низці виробництв України технологію суміщення процесів випарювання та сушіння в єдиному випарно-сушильному агрегаті "ИСПАР-700" продуктивністю 700 кг випареної вологи на годину для отримання порошкових молочних продуктів. Ця технологія, в деякому аспекті, є альтернативною до традиційної технології окремого випарювання молочних продуктів у вакуум-випарних апаратах з подальшим висушуванням концентратів в розпилювальних сушильних установках. Традиційна технологія має свої переваги, які пов'язані з досить високою енергетичною ефективністю реалізації процесу випарювання

в багатокорпусних вакуумних випарних апаратах. Її ж недоліками, в свою чергу, є потреба в потужній котельній установці, в жорсткій залежності технологічних параметрів процесів від режимів роботи котельні (параметрів пару), використання для підтримання вакууму значного обсягу холодної води, суттєвих скидів в каналізаційну мережу води, забрудненої молочними продуктами, значні викиди в навколишнє середовище пилевидної фракції кінцевої продукції (порошку) разом з відпрацьованим в сушильній установці теплоносієм.

Технологічна схема використання в єдиному агрегаті процесів випарювання та сушіння на прикладі роботи випарно-сушильної установки "ИСПАР-700" передбачає теплозабезпечення від власних теплогенераторів, здійснення процесу випарювання розчину на першій стадії методом розпилювального зневоднення, глибоку утилізацію тепла відпрацьованого в сушильній стадії теплоносія за рахунок його подачі у випарну камеру, поверненням в процес пилевидної фракції порошку.

Поеднання в єдиному агрегаті процесу розпилювального зневоднення та сушіння базується на проведенні в Інституті технічної теплофізики НАН України теоретичних та експериментальних дослідженнях та виявлених закономірностях зневоднення крапель розчинів [1]. Дослідження показали, що для кожного розчину існує критична вологість – вологість кіркоутворення,

яка поділяє процес зневоднення на два періоди, які принципово відрізняються: низькотемпературний - "випарний", що протікає при температурі рівноважного випаровування, і високотемпературний - "сушильний", в якому температура краплі підвищується і який, в свою чергу, складається з періодів кіркоутворення, кипіння, і власне періоду сушіння. У випарному періоді видалення вологи відбувається з поверхні краплі при температурі, близькій до температури, так званого, «мокрого термометра». Інтенсивність видалення вологи при цьому визначається в основному зовнішніми процесами тепловологопереносу і на цій стадії можливе застосування високотемпературного теплоносія без небезпеки перегріву продукту, який зневоднюється. У сушильному ж періоді інтенсивність видалення вологи з краплі сповільнюється, зона випаровування просувається вглиб краплі і її температура починає зростати. При досягненні розчином температури кипіння відбувається інтенсивне пароутворення всередині частинки і поверхнева оболонка в періоді кипіння, при відносно постійній температурі, може зазнавати значних деформативних змін [2]. Після закінчення періоду кипіння з частки видаляється вся "вільна" волога і в заключному періоді сушіння при монотонному підвищенні тем-

ператури відбувається видалення "зв'язаної" вологи аж до досягнення часткою рівноважної вологості. Для термолабільних продуктів дуже важливо не допускати перегріву продукту. Тому в сушильній стадії зневоднення, коли температура краплі зростає, для збереження якісних показників продукту потрібне застосування більш м'яких температурних режимів сушіння.

Дослідження показали, що існують методи управління кінетикою процесу зневоднення, які дозволяють як зменшувати термічний вплив на продукт при розпилювальному сушінні, так і підвищувати інтенсивність знімання вологи з об'єму апарату [2,3]. Уточнення фізичної моделі процесів перенесення тепла та вологи при зневодненні краплі розчину дозволило створити математичну модель процесів тепло- і вологопереносу в розпилювальному апараті, описавши її системою інтегро-диференціальних рівнянь 2-го порядку, та розробити методику розрахунку габаритів камери [4]. Розв'язання задач з оптимізації дозволили розрахувати випарювально-сушильний агрегат з рециркуляцією розчину "ИСАР-700" для процесів отримання порошкоподібних молочних продуктів.

При застосуванні агрегату "ИСАР-700" технологічна схема висушування молочних продуктів здійснюється наступним чином (рис. 1).

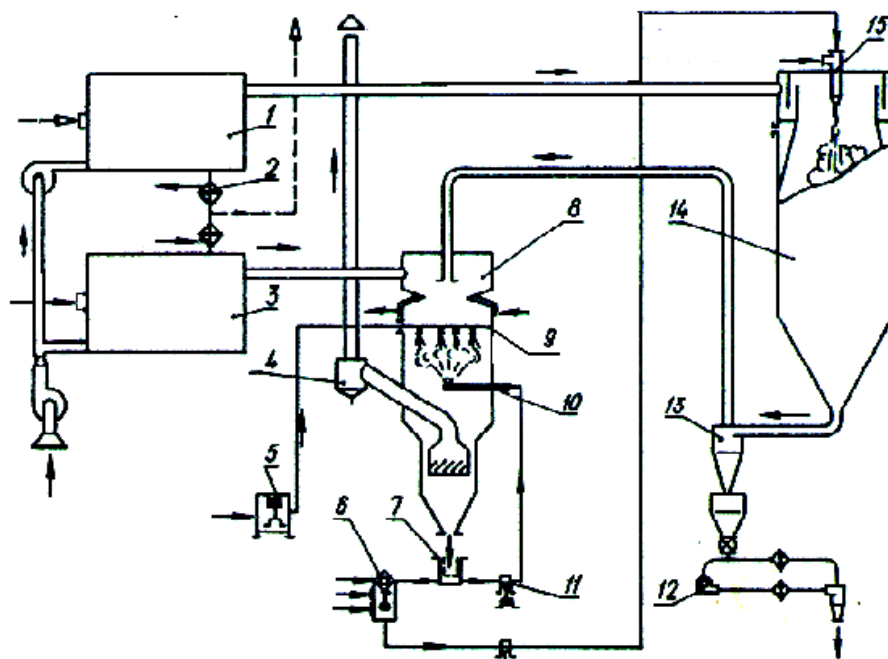


Рис. 1. Технологічна схема висушування молочних продуктів на базі агрегату ИСАР-700:
 1, 3 – вогневі калорифери; 2 – підігрівачі технічної води; 4 – сепаратор; 5, 11 – насоси;
 6 – емульгатор; 7 – ємність з концентрованим розчином; 8 – випарна камера;
 9 – форсунки; 10 – гідравлічна форсунка; 12 – система охолодження та транспортування порошку; 13 – циклон; 14 – сушильна камера; 15 – пневматична форсунка

В вогневих калориферах (1,3) теплоносії підігрівається до температур 200...250 °С і подається в випарну (8) та сушильну (14) камери. Вихідний розчин (молочні відвійки, склотини, сироватка) насосом високого тиску (5) подається у форсунки (9) випарної камери (8). Зконцентрований продукт після виходу з камери насосом (11) частково подається на рециркуляцію у форсунки (10) випарної камери, інша частина концентрату після змішування з необхідними домішками та проходження емульгатора (6) подається на пневматичну форсунку (15) сушильної камери (14). У сушильній камері в потоці теплоносія концентрат висушується і порошок після проходження системи пневматичного транспортування (12) подається на фасування. Відпрацьований у випарній камері теплоносії з низькою температурою, близькою до температури мокрого термометра, після проходження сепаратора (4) викидається в атмосферу. Це дозволяє підвищити термічний к.к.д. агрегату, а також практично ліквідувати викиди продукту в атмосферу. Товарний вихід продукту при роботі агрегату досягав значень 97,7 %. Розвинута поверхня контакту крапель, мала тривалість перебування крапель у камерах, невисокі температури нагрівання продукту (45...50 °С) при його випарюванні та висушуванні прак-

тично повністю унеможливило термічне розкладання білків і вітамінів, про що свідчить висока розчинність кінцевого продукту (понад 99 %) та подвійний, у порівнянні з порошком, отриманим із застосуванням вакуум-випарних апаратів (в яких тривалість термічної обробки на 1-2 порядки вища), вміст вітамінів А, С, Е.

Система охолодження при пневматичному транспортуванні порошку (12), що застосовується в агрегаті, дозволяє за досить короткий термін знизити температуру продукту перед його затарюванням і тим самим забезпечити належні умови для тривалого зберігання сухих молочних продуктів. При використанні агрегату "ИСАР-700" для отримання заміниacza незбираного молока відпадає необхідність у будівництві очищувальних систем, вартість яких є досить високою і може дорівнювати вартості будівництва основного виробництва.

Теплотехнічні показники роботи агрегату при напрацюванні партій порошкових молочних продуктів – заміниacza незбираного молока, отриманого на основі молочних відвійок, жирів та вітамінів з використанням випарно-сушильного агрегату "ИСАР-700", наведені в таблиці.

Їх аналіз свідчить про те, що вихідний продукт (молочні відвійки) у випарній камері упарювався

Таблиця. Теплотехнологічні показники роботи технологічної лінії отримання порошкового заміниacza незбираного молока при використанні агрегату «ИСАР-700»

Показник	Тривалість роботи, годин		
	12	34	7
Продуктивність по випареній волозі, кг/год			
- випарної камери	550	575	565
- сушильної камери	130	135	135
- Агрегату	680	710	700
Концентрація вихідного розчину, %	9,7	9,3	9,2
Концентрація розчину після випарної камери, %	28	30	30
Вміст вологи в порошку, %	3,1	3,5	3,7
Температура порошку, °С	51	52	52
Продуктивність по порошку, кг/год	57,1	60,6	59,8
Температурні показники теплоносія, °С			
- на вході у випарну камеру	211	228	218
- на виході з випарної камери	53	52	51
- на вході у сушильну камеру	187	189	183
- на виході із сушильної камери	89	90	88
Потужність, що споживається електрообладнанням, кВт:	120	120	120
Витрати палива, кг/ год	59	59	59

від початкової концентрації 9,2...9,7 % до кінцевої 28...30 % при температурах теплоносія на вході у випарну камеру 211...228 °С і на виході 51...53 °С. У сушильній камері концентрат висушувався до кінцевої вологості 3,1...3,7% при $t_{\text{вх}} = 183...189\text{ °С}$ і $t_{\text{вих}} = 88...90\text{ °С}$. При напрацюванні порошків заміника незбираного молока продуктивність камер по випареній волозі становила: випарної – 550...575 кг/год, сушильної – 130...135 кг/год. Загальна продуктивність агрегату становила 700 кг/год по випареній волозі [5].

В номінальних режимах електроенергетичне обладнання агрегату працювало із сумарним навантаженням 120 кВт. Вогневими калориферами для підігрівання повітря за 1 год споживалось 59 кг рідкого палива (мазуту). Ця кількість палива з урахуванням його теплотворної здатності еквівалентна 645 кВт.год теплової енергії. Таким чином у виробництві сухого заміника незбираного молока для здійснення процесу випарювання 700 кг вологи на годину випарно-сушильним агрегатом ИСАР-700 споживалося 765 кВт.год електричної та теплової енергії, тобто менше 1,1 кВт.год енергії в перерахунку на 1 кг випареної вологи.

Висновки

Отримані показники (1,1 кВт.год енергії, або 861 ккал в перерахунку на 1 кг випареної вологи) свідчать про високу теплову ефективність реалізації випарного та сушильного процесів при зневодненні молочних продуктів розпилювальним методом в одному агрегаті. З урахуванням повторного використання відпрацьованого в сушильній камері теплоносія в процесі випарювання, викидами в атмосферу теплоносія з відносно низьким температурним потенціалом (51...53 °С), істотно менших (практично відсутніх) викидів порошку в навколишнє середовище (в порівнянні з традиційною технологією упарювання молочних продуктів у вакуум-випарних апаратах і сушінням концентрату в розпилювальних сушильних установках), відсутності потреби в парі, а значить і в котельні, відсутності потреби в великих обсягах води для функціонування вакуум-випарних апаратів, відсутніх зливів в каналізацію значних об'ємів забрудненої молочними продуктами води, технологія здійснення процесів випарювання та сушіння молочних продуктів розпилювальним методом в єдиному агрегаті може розглядатися як ефективною, як з точки зору енергетичних витрат, так і екологічної чистоти.

ЛІТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Оптимизация процессов распылительной суши.- Киев: Наукова думка, 1984.-240с.
2. Долинский А.А., Малецкая К.Д., Шморгун В.В. Кинетика и технология суши распылением. Киев: Наукова думка, 1987. 224с.
3. Долинский А.А., Малецкая К.Д., Распылительная сушка: В 2-х т., Т.1. Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения.- Киев: Академперіодика. 2011.-376 с.
4. Долинский А.А., Дамский Л.М., Малушенко А.Т. Расчет процессов переноса в распылительных аппаратах - В кн.: Опыт применения распылительных сушильных установок. Киев: Наукова думка, 1976, С.62-68.
5. Долинський А.А., Шморгун В.В., Шморгун А.В. Підвищення ефективності роботи розпилювальних сушарок. Аспекти енергозощадження.- Київ: ВД “Академперіодика”, 2006.-141с.

ENERGY AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF EVAPORATION AND DRYING OF LIQUID PRODUCTS IN A SINGLE EVAPORATION-DRYING UNIT

Shmorgun V.V.¹, Martiuk O.V.²

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine

¹PhD (Engin.), Leading Researcher; shmorgun@nas.gov.ua, <http://orcid.org/0000-0001-6303-7220>

²Junior Researcher; martiuk_o76@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.5>

The energy consumption indicators of the technology of combining evaporation and drying of liquid products in a single unit were studied. The results of the approbation of this technology are presented on the example of the operation in industrial conditions of the "ИCAP-700" unit, developed at the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Analysis of thermo-technological processing characteristics as applied to producing dry powdered milk products with using the evaporation-type recirculation drier "ИCAP-700" has been performed. It has been shown that the given technology, which allows the performance of both evaporation and drying processes with the aid of the same spray drier, may be considered as a very efficient method of dehydration from viewpoints of energy saving and environmental protection.

Thus, in the production of dry substitute for whole milk, 703 kWh were consumed for the evaporation process of 700 kg of moisture per hour by the "ИCAP-700" evaporation-drying unit. Electrical and thermal energy, i.e. 1.1 kWh of energy per 1 kg of evaporated moisture. These indicators testify to the high thermal efficiency of both the heat generators included in the "ИCAP-700" unit, as well as the practical implementation of evaporation and drying processes during the dehydration of dairy products by the spray method. Taking into account the significantly smaller (practically absent) emissions of powder into the

environment, compared to the traditional technology of evaporation of dairy products in vacuum evaporators and drying of the concentrate in spray dryers, the absence of the need for steam, and therefore also in the boiler room, the absence of the need for large volumes of water for the operation of vacuum-evaporating devices, the absence of discharges into the sewage network of used water contaminated with dairy products, the technology of carrying out the processes of evaporation and drying of dairy products by the spray method in a single unit with its own autonomous heat generators can be considered as very effective, both from the point of view of energy consumption, and environmental cleanliness.

References 5, tables 1, figures 1.

Keywords: evaporation, spray drying, evaporation-drying unit, energy consumption indicators, analysis.

1. Dolinsky A.A., Ivanytskyi G.K. [Optimization of spray drying processes], Kyiv: [Scientific Thought] 1984.240p. (in Rus.)

2. Dolinsky A.A., Maletskaya K.D., Shmorgun V.V. [Kinetics and technology of spray drying]. Kyiv, [Scientific Thought], 1987. 224p. (in Rus.)

3. Dolinsky A.A., Maletskaya K.D. [Spray drying]. Kyiv, [Academperiodical], 2011, V.1, 376p. (in Rus.)

4. Dolinsky A.A., Damsky L.M., Malushenko A.T. [Calculation of transfer processes in spray apparatus], In the book: [Experience in the use of spray dryers]. Kyiv, [Scientific Thought], 1976, pp. 62- 68. (in Rus.)

5. Dolinsky A.A., Shmorgun V.V., Shmorgun A.V. [Improving the efficiency of spray dryers. Aspects of energy saving]. Kyiv, [Scientific Thought], 1984. 240p. (in Ukr.)

Отримано 04.10.2023

Received 04.10.2023

Прийнято до друку 15.02.2024
Accepted for publication 15.02.2024