**Тихтило Б.В.**

аспірант

**Полтавський державний
аграрний університет****Tykhtylo B.**

postgraduate student

**Poltava State Agrarian
University****УДК 66.047.596****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-1-17**

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ПОТОКІВ У СУШИЛЬНІЙ КАМЕРІ ІЗ ВЕРХНІМ ПІДВЕДЕННЯМ ТЕПЛОНОСІЯ

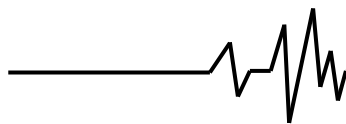
Дослідження повітряних потоків у сушильній камері із верхнім підведенням теплоносія є важливим аспектом оптимізації процесів сушіння, що впливає на рівномірність розподілу тепла, ефективність теплообміну та енергоспоживання. У статті розглядаються особливості формування повітряних потоків у камері з верхнім введенням теплоносія, що дозволяє забезпечити рівномірний розподіл теплової енергії у робочому об'ємі. Дослідження базується на числовому моделюванні та експериментальному аналізі руху повітряних потоків, що дозволяє визначити оптимальні режими роботи сушильної камери. Розглядається вплив параметрів, таких як швидкість теплоносія і час перебування частинки в потоці теплоносія, кут нахилу лопаток зовнішнього ряду, конструкційні особливості камери та розташування сушильного матеріалу, на ефективність процесу сушіння. Визначено, що правильна організація повітряного потоку сприяє зниженню теплових втрат і рівномірному прогріванню матеріалу, що, у свою чергу, підвищує якість кінцевого продукту, зокрема, впорядкування швидкісних потоків теплоносія в сушильній камері призвело до зростання продуктивності сушильної установки приблизно на 10%. Проведене моделювання дозволило виявити зони з можливими застійними областями, де циркуляція повітря є недостатньою, що може призводити до нерівномірного висихання продукції. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення конструкцій сушильних камер та оптимізації технологічних режимів сушіння різних матеріалів. У статті на основі експериментальних даних було побудовано криві розподілу швидкостей потоку теплоносія в сушильній камері радіусом R на висоті 1 м, 2 м, 3 м у вертикальному напрямку від вихідного перерізу повітророзподільника. Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що застосування верхнього підведення теплоносія може забезпечити кращий контроль за процесом висихання, що робить цей метод перспективним для впровадження у промислових умовах.

Ключові слова: сушіння, сухе молоко, розпилювання, дисковий розпилювач, сушильна камера.

Постановка проблеми. Аеродинамічні особливості в прямоточних розпилювальних сушарках, де сушильний агент подається концентровано зверху до основи факела розпилення, досліджені недостатньо. У математичних моделях і розрахунках цей аспект враховується лише умовно. Крім того, відсутність точних даних щодо аеродинаміки не дає змоги повною мірою оцінити взаємодію частинок із

сушильним агентом у просторі камери сушіння та визначити шляхи вдосконалення таких установок [1].

Аналіз останніх публікацій і досліджень. Розробка високопродуктивних розпилювальних сушарок, які є більш енергоефективними та здатними виробляти високоякісне сухе молоко, дуже важлива для майбутнього промисловості сухої молочної продукції. Розуміння та оптимізація існуючих сушарок також мають велике значення. Обчислювальна динаміка рідини є потужним



інструментом для моделювання та сприяння розумінню характеристик сушіння розпиленням і впровадження потенційно вдосконалених конструкцій.

Науковці Туфекчі В. І. та Вересоцький Ю. І. математично описали процес розпилювальної сушки на основі пілотної розпилювальної сушарки. Зокрема, дослідження виконувалися із використанням пакета програмного забезпечення CFD ANSYS FLUENT із моделюванням на основі 3D моделей сушарки. Експерименти з розпилювальним сушінням проведені за параметрами молочної сироватки [2].

Дубковецький І. В. [3] акцентує увагу на тому, що основною метою процесу сушіння є забезпечення максимальної якості продукції при мінімальних витратах електроенергії. З точки зору енергоефективності, інфрачервоне випромінювання є найбільш раціональним методом зневоднення глоду, проте його широке застосування обмежене явищем термодифузії. У роботі представлено дослідження кінетики процесу сушіння глоду за допомогою терморадіаційного, конвективного та комбінованого методів.

У роботі [4] обговорюються основні параметри проектування розпилювальних сушарок. Застосовано лагранжевий підхід, що поєднує експериментальні дані з теоретичними концепціями, для розробки методів проектування. Наведено кореляцію та представлено моделі вихрових потоків, що отримані експериментально в камері лабораторного розміру.

На основі даної методології проектування наведено обчислювальні методи для розрахунку траєкторій руху частинок і, отже, для прогнозування оптимальних розмірів камери та умов експлуатації для забезпечення максимальної теплової ефективності та/або мінімальних експлуатаційних витрат. Застосування даних базових принципів проілюстровано на прикладі проектування камери розпилювального сушіння промислового розміру для конкретного розчину сировини та виробничої потужності.

У дослідженні [5] основну увагу зосереджено на багатофазному потоці в промисловій розпилювальній сушарці з використанням пакету CFD FLUENT. У моделюванні використовується підхід Ейлера-Лагранжа. Нова модель сушіння, модель REA, для часток молока була вперше реалізована в програмі CFD. Науковці Jin Y. та Chen, X. стверджують, що гранична умова «відбиваючої стіни» дає більш фізично коректні результати для нормальної роботи сушарки, ніж гранична умова «відбиваючої стіни». Друге – це надмірне спрощення. Було проаналізовано вплив розміру частинок і розподілу частинок за розмірами, часу перебування, кінетичної енергії та максимальної температури.

Мета дослідження. Представити результати експериментального аналізу аеродинамічних характеристик сушильного агента в камерах сушіння, визначити розподіл осьових складових швидкості повітря v по радіусу R сушильної камери, що дозволить отримати уявлення про характер розподілу повітря вздовж поточного радіуса камери на різних відстанях від площини розпилення.

Викладення основного матеріалу. Дослідження виконували на установці, що здатна випаровувати 500 кг вологи за годину. Сушильна камера виконана у формі циліндричного корпусу з конічним днищем з наступними розмірами: діаметр циліндричної частини – 5,7 м, висота – 4 м, кут розкриття конуса – 60°. Оброблені експериментальні дані представлені на рисунках 1–4 у вигляді графіків, що відображають розподіл складових швидкостей v сушильного агента в об'ємі сушильної камери.

Тестову серію вимірювань проведено у площині на висоті 2 м від вихідного перерізу повітророзподільника. Довжина струменя до точки вимірювання становила 3 м. Результати вимірювань наведено на рисунку 1. Додатні значення швидкості відповідають напрямку руху основного потоку теплоносія. Початкова швидкість витікання теплоносія з повітророзподільника складає 11 м/с, що відповідає швидкості потоку, а у момент досягнення стінки сушильної камери – 3,4 м/с.

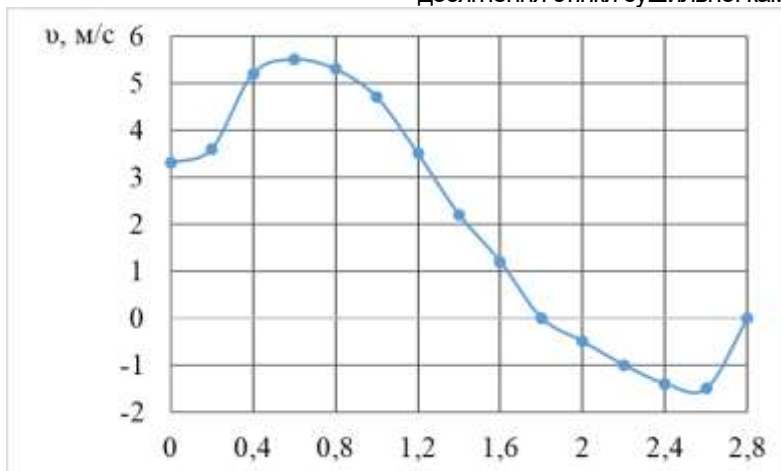
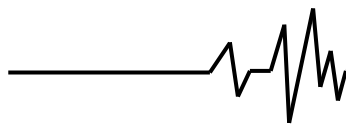


Рис. 1. Крива розподілу швидкості v потоку теплоносія в сушильній камері радіусом R на висоті 2 м у вертикальному напрямку від вихідного перерізу повітророзподільника



Розподіл швидкостей (рис. 1) вказує на наявність значного потоку теплоносія вздовж осі сушильної камери, спрямованого до вихідного патрубку. На основі цього було висунуто припущення, що аеродинамічні умови в цій сушильній камері далекі від оптимальних. Такий висновок підтверджується також тим, що продуктивність сушарки є нижчою за паспортні значення, а якість висушеного продукту не відповідає належним показникам, що видно з наведених нижче результатів вимірювань. Особливе занепокоєння викликала присутність у готовому продукті обгорілих частинок, що пов'язували з наявністю в периферійній верхній зоні сушильної камери великої застійної області. У цю зону потрапляє значна кількість частинок продукту з основного потоку теплоносія. Подальше обстеження сушильних камери, зокрема аналіз роботи повітророзподільного пристрою, дозволило встановити причину цього явища: неправильне розташування направляючих лопаток повітророзподільника.

Повітророзподільник у сушильних установках даного типу має два кільцевих конічних канали, всередині яких розміщено два ряди направляючих лопаток, що обертаються відносно твірної відповідного конуса повітророзподільника. Кут нахилу лопаток зовнішнього ряду визначає траєкторію зовнішньої межі основного потоку теплоносія, тоді як кут нахилу лопаток внутрішнього ряду формує траєкторію його внутрішньої межі. Виходячи з цього, оптимальний кут нахилу лопаток розраховували за формулою:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{H \sin \beta}{l_t}\right), \quad (1)$$

де: l_t – довжина лінійної твірної гіперboloїда, м; H – висота гіперboloїда повітророзподільника, м; β – кут нахилу твірної

конуса повітророзподільника до горизонтальної площини, град.

Мінімальний час перебування розпиленних частинок продукту в потоці основної струї теплоносія для даної конструкції сушильної камери відповідає проміжку від моменту виходу елементарного об'єму теплоносія з повітророзподільника до моменту його досягнення стінки сушильної камери. Даний показник є одним із визначальних при проектуванні прямооточних розпилювальних сушильних установок. Мінімальний час перебування розпиленних частинок продукту в потоці основної струї теплоносія визначали за рівнянням [6]:

$$t = 9,57 \frac{s_{\text{тр}}}{\vartheta} + 2 \frac{l_{\text{гв}} - 9,57 s_{\text{тр}}}{\vartheta \left(1 + \frac{0,96 s_{\text{тр}}}{0,07 l_{\text{гв}} - 0,38 s_{\text{тр}}}\right)}, \quad (2)$$

де: $s_{\text{тр}}$ – товщина струменя, що витікає з повітророзподільника, м; $l_{\text{гв}}$ – довжина твірної гіперboloїда внутрішньої межі струменя, м; ϑ – середня швидкість витікання теплоносія з повітророзподільника, м/с.

Розраховані значення кутів встановлення лопаток відносно твірної конуса повітророзподільника склали: для зовнішнього ряду – 49° , для внутрішнього – 31° . Після монтажу направляючих лопаток у визначеному положенні було проведено вимірювання розподілу швидкості потоку теплоносія у трьох площинах на висотах 1, 2 і 3 м від вихідного перерізу повітророзподільника. При цьому середня довжина струменя до точки вимірювання становила відповідно 1,5; 3 і 4,5 м.

На рисунках 2-4 наведені результати вимірювань. Наявність від'ємних значень швидкості потоку поблизу осі та на периферії сушильної камери вказує на зворотний рух частинок у цих зонах.

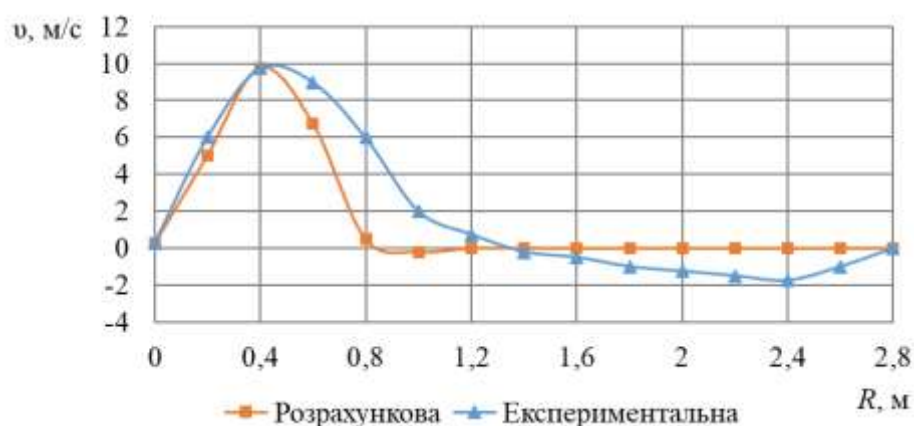


Рис. 2. Криві розподілу швидкостей ϑ потоку теплоносія в сушильній камері за радіусом R на висоті 1 м у вертикальному напрямку від вихідного перерізу повітророзподільника.

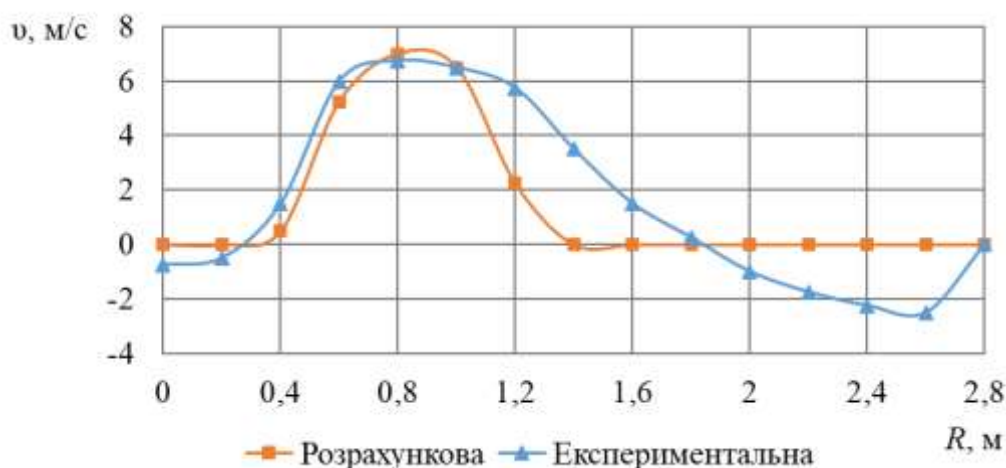
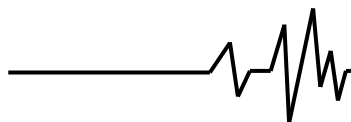


Рис. 3. Криві розподілу швидкостей v потоку теплоносія в сушильній камері за радіусом R на висоті 2 м у вертикальному напрямку від вихідного перерізу повітророзподільника

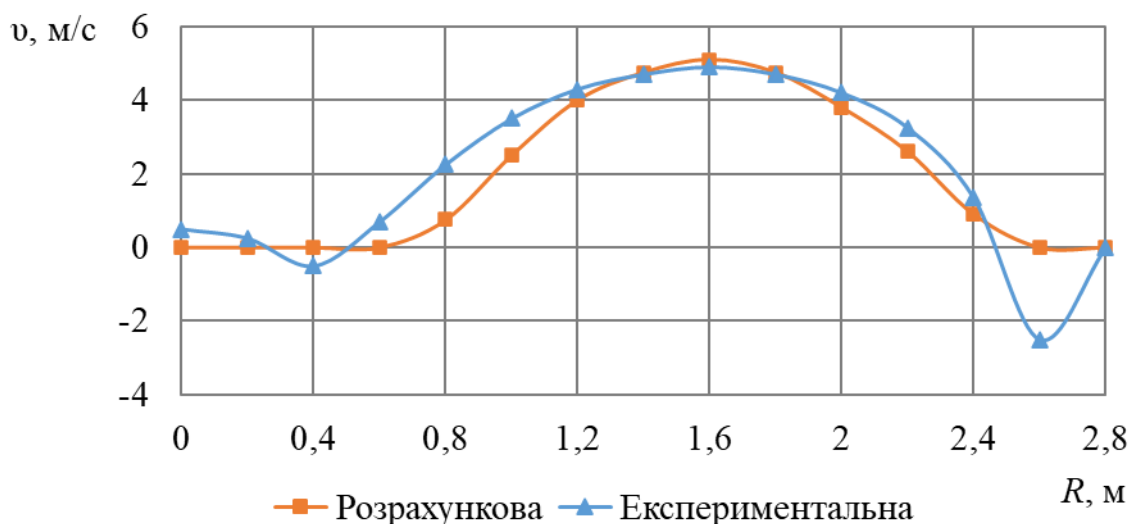


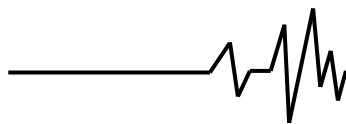
Рис. 4. Криві розподілу швидкостей v потоку теплоносія в сушильній камері за радіусом R на висоті 3 м у вертикальному напрямку від вихідного перерізу повітророзподільника

Наведені результати вимірювань свідчать про наявність у сушильній камері впорядкованих основних потоків теплоносія, характер яких можна з високою достовірністю описати за допомогою класичної теорії струминної течії газових потоків. Ширший профіль швидкостей (зміщення правої гілки профілю вправо на рисунках 2 і 3) у порівнянні з теоретичною кривою, ймовірно, пояснюється існуванням зворотних потоків теплоносія в периферійній зоні.

З метою оцінки змін параметрів процесу та якісних характеристик сухих продуктів було проведено відповідні вимірювання під час

роботи сушильної установки при виробництві сухого цільного молока до та після реконструкції. Результати вимірювань наведено в таблиці 1.

Температуру повітря на вході і виході, а також розрідження в сушильній камері визначали за допомогою штатних приладів. Якісні показники продуктів оцінювали стандартними методами. Продуктивність сушарки за випареною вологою визначали в усталеному режимі її роботи, спираючись на витрату згущеного молока.



Таблиця 1. Зміни параметрів процесу сушіння та характеристик сухих продуктів до та після реконструкції сушарки

Параметри процесу та продукту	Одиниця вимірювання	До реконструкції	Після реконструкції	Паспортні дані
Загальна площа внутрішньої поверхні сушильної камери	м ²	142,5	142,5	142,5
Продуктивність сушильної установки за випареною вологою	кг/год	486	522	510
Температура теплоносія на вході в сушильну камеру	°C	180	180	180
Температура відпрацьованого повітря на виході із сушильної камери	°C	90	82	–
Витрата теплоносія	м ³ /год	19800	19800	19800
Вологонавантаженість сушильної камери	кг·с/м ²	3,26	3,50	3,4
Розрідження в сушильній камері	Па	120	130	–
Масова частка сухих речовин у згущеному продукті	%	48	48	48
Витрата згущеного продукту	кг/год	966	1042	980
Масова частка вологи у сухому продукті	%	3,8	3,8	3,8
Масова частка жиру у сухому продукті	%	25,2	25,2	25,2
Індекс розчинності сухого продукту	мл сирого залишку	< 0,1	<< 0,1	<< 0,1
Група чистоти сухого продукту	-	2	1	1

З таблиці 1 видно, що впорядкування швидкісних потоків теплоносія в сушильній камері призвело до зростання продуктивності сушильної установки приблизно на 10%. У такій же мірі зменшилися питомі енерговитрати, оскільки загальне споживання енергії залишилося незмінним.

Зниження температури відпрацьованого повітря на виході з сушильної башти свідчить про більш ефективне використання теплової енергії. Покращилася якість продукту, зокрема зменшилася кількість обгорілих частинок завдяки зниженню потрапляння частинок продукту у периферійну область біля стелі.

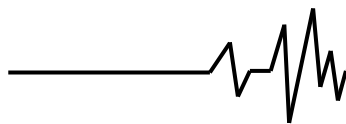
Особливо варто підкреслити, що позитивний результат було досягнуто шляхом реалізації технічного рішення, отриманого розрахунковим методом. Це підтверджує достовірність проведених досліджень.

У цілому можна констатувати, що в прямооточній вертикальній сушильній камері з верхнім розташуванням повітророзподільника та розпилювального пристрою поблизу стінок камери та в її центральній частині утворюється зворотний рух теплоносія знизу вгору, а у верхній зоні камери формуються застійні області. Це явище зумовлене наявністю тангенціальної складової швидкості теплоносія, що надходить у сушильну камеру у вигляді розширюваного затопленого струменя.

Такі особливості течії знижують ефективність процесу сушіння. По-перше, відпрацьоване охолоджене повітря піднімається у верхню частину камери, що зменшує тепловий потенціал теплоносія. По-друге, частинки висушеного продукту, захоплені відпрацьованим повітрям, перегріваються, що негативно впливає на якість кінцевого продукту. І, нарешті, по-третє, інтенсивні завихрення у верхній зоні камери сприяють налипанню продукту на стінки та стелю, що є досить небажаним явищем. При цьому застійні зони не беруть участі у процесі сушіння і, по суті, можуть вважатися «паразитними». Таким чином, можна зробити висновок, що об'єм вертикальних прямооточних сушильних камер використовується нераціонально.

Проведені дослідження дають змогу розробити конструкції прямооточних розпилювальних сушильних камер, які максимально вільні від згаданих вище «паразитних» зон. Одним із рішень даної проблеми є конічне виконання верхньої частини, форма якої наближена до основного потоку теплоносія всередині камери. Таке розташування циліндричної та конічної частин повинні раціонально забезпечити спрямування всієї товщини основного струменя теплоносія.

Визначальним параметром, що впливає на досягнення розпиленою частинкою кінцевої



вологості, є час її перебування у потоці теплоносія, який відповідає періоду проходження потоку від повітророзподільника до стінки сушильної камери і становить 0,23–0,25 с. Для забезпечення нормального перебігу процесу сушіння необхідно дотримуватися певного співвідношення між кількістю продукту та теплоносія, що надходять у зону їх взаємодії. Для промислових сушарок це співвідношення становить приблизно 20 кг теплоносія на 1 кг продукту за температури теплоносія 180°C та масової частки сухих речовин у вихідному продукті на рівні 48%. Абсолютна швидкість теплоносія при цьому майже не впливає на процес сушіння, оскільки вона значно нижча за початкову швидкість розпилюваних частинок продукту. Якщо зменшити швидкість теплоносія без зміни його витрати, то можна зменшити розміри сушильної камери.

Необхідно зазначити, що площа поверхні стінок сушильної камери такої конструкції, а відповідно і її маса та вартість, у півтора рази менші порівняно з наявними конструкціями аналогічної продуктивності. Одним із недоліків прямоточних сушильних камер є їх значна висота, що створює певні труднощі під час будівництва та експлуатації.

Висновки. Таким чином, результати аналітичних та експериментальних досліджень, проведених у межах цієї роботи, дали змогу встановити взаємозв'язок між особливостями руху теплоносія, конструктивними параметрами повітророзподільних пристроїв і розмірами сушильних камер. Проведено експериментальну перевірку отриманих даних на сушильній установці.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що застосування верхнього підведення теплоносія може забезпечити кращий контроль за процесом висихання, що робить цей метод перспективним для впровадження у промислових умовах. До перспективних напрямів дослідження відносимо: оптимізацію повітропроводів, регулювання швидкості потоків та використання адаптивних систем управління подачею теплоносія як шляхів подальшого вдосконалення конструкцій сушильних камер.

Список використаних джерел

1. Ullum T. Simulation of a spray dryer with rotary atomizer: the appearance of vortex breakdown. In: *Proceedings of the 15th International Drying Symposium*. 2006, pp. 20–23.
2. Туфекчі В. І., Вересоцький Ю. І. Дослідження верхнього жалюзійного розподілення теплоносія та визначення ефективних параметрів сушіння в комплексах розпилювального типу. *Харчова*

Промисловість НУХТ. 2021, № 30, С. 96–109.

3. Дубковецький І. В., Малезжик І. Ф., Стрельченко Л. В., Євчук Я. В. Дослідження кінетики конвективно-терморадіаційного сушіння. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*. 2015, Вип. 47(2), С. 18–22.

4. Gauvin W. H., Katta S. Basic concepts of spray dryer design. *AIChE Journal*. Vol. 22, No. 4, pp. 713–724.

5. Jin Y., Chen X.D. Numerical study of the drying process of different sized particles in an industrial-scale spray dryer. *Drying Technol.* 2009, 27 (3), 371–381.

6. Kim E.H.J., Dong Chen X., Pearce D. On the mechanisms of surface formation and the surface compositions of industrial milk powders. *Drying Technol.* 2003, 21 (2), pp. 265–278.

References

1. Ullum, T. (2006). Simulation of a spray dryer with rotary atomizer: the appearance of vortex breakdown. In: *Proceedings of the 15th International Drying Symposium*. 20–23.

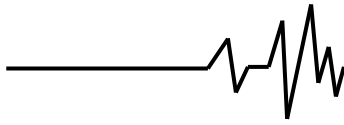
2. Tufekchi, V. I., Veresotskyi, Yu. I. (2021). Doslidzhennia verkhnoho zhaliuziinoho rozpodilennia teplonosii ta vyznachennia efektyvnykh parametriv sushinnia v kompleksakh rozpyliuvального типу [Investigation of the upper louver distribution of the coolant and determination of effective drying parameters in spray-type complexes]. *Kharchova Promyslovist NUKhT* [Food Industry NUFT], № 30, 96–109. [in Ukrainian].

3. Dubkovetskyi, I. V., Malezhyk, I. F., Strelchenko, L. V., Yevchuk, Ya. V. (2015). Doslidzhennia kinetyky konvektyvno-termoradiatsiinoho sushinnia [Study of the kinetics of convective-thermal-radiation drying]. *Naukovi pratsi Odeskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnolohii* [Scientific works of the Odesa National Academy of Food Technologies], Vyp. 47(2), 18–22. [in Ukrainian].

4. Gauvin, W. H., Katta, S. Basic concepts of spray dryer design. *AIChE Journal*, Vol. 22, No. 4, 713–724.

5. Jin, Y., Chen, X.D. (2009). Numerical study of the drying process of different sized particles in an industrial-scale spray dryer. *Drying Technol*, 27 (3), 371–381.

6. Kim, E.H.J., Dong Chen, X., Pearce, D. (2003). On the mechanisms of surface formation and the surface compositions of industrial milk powders. *Drying Technol*, 21 (2), 265–278.

**INVESTIGATION OF AIRFLOWS IN A DRYING CHAMBER WITH TOP HEAT CARRIER SUPPLY**

The study of airflow patterns in a drying chamber with top heat carrier supply is a crucial aspect of optimizing drying processes, as it influences the uniformity of heat distribution, heat exchange efficiency, and energy consumption. The study considers the impact of key parameters such as heat carrier velocity, particle residence time in the heat carrier flow, the inclination angle of the outer row blades, the structural features of the chamber, and the arrangement of drying material on drying efficiency. It has been established that proper organization of the airflow contributes to reducing heat losses and ensuring uniform material heating, which, in turn, enhances the quality of the final product. Notably, optimizing the velocity profiles of the heat carrier in the drying

chamber resulted in a productivity increase of approximately 10%. The conducted simulations identified areas with potential stagnation zones, where air circulation is insufficient, potentially leading to uneven drying of the product. The obtained results can be utilized to improve the design of drying chambers and optimize the technological drying regimes for various materials. Based on experimental data, velocity distribution curves of the heat carrier flow were constructed for a drying chamber with a radius R at heights of 1 m, 2 m, and 3 m in the vertical direction from the outlet section of the air distributor. Analysis of the results indicates that the implementation of top heat carrier supply can provide better control over the drying process, making this method a promising approach for industrial applications.

Key words: drying, dry milk, spraying, disc atomizer, drying chamber.

Відомості про автора

Тихтило Богдан Володимирович – аспірант, спеціальність 133 «Галузеве машинобудування» кафедри механічної та електричної інженерії, Полтавський державний аграрний університет (вул. Сковороди, 1/3, Полтава, Україна, 36003, e-mail: bohdan.tykhtylo@pdau.edu.ua, ORCID: 0009-0009-6277-0346).

Tykhtylo Bohdan – graduate, specializing 133 “Industrial Engineering”, Department of Mechanical and Electrical Engineering, Poltava State Agrarian University (Skovorody Str. 1/3, Poltava, Ukraine, 36003, e-mail: bohdan.tykhtylo@pdau.edu.ua, ORCID: 0009-0009-6277-0346).