

ПОКРАЩАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ДОСУШКИ НА ОСНОВІ ЛОКАЛЬНОГО ПІДХОДУ

Т. Т. Супрун, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

E-mail: suprun@secbiomass.com

Анотація. У сучасних умовах енергозберігаючі технології широко використовуються в різних технологічних процесах, зокрема, в процесах сушіння. Енергозбереження досягається різними шляхами, в тому числі за рахунок вторинної переробки відходів вихідного продукту, зокрема, висушених рослинних відходів.

Об'єктом дослідження є система підводу теплоносія установки для досушування та технологічного кондиціювання відходів рослинної сировини.

Мета роботи - розроблення методів покращення аеродинамічних характеристик системи підводу теплоносія на основі локального контролю теплофізичних параметрів у характерних зонах робочого середовища.

Традиційним методом, який застосовується в ІТТФ НАН України для вивчення процесів переносу типових для теплоенергетичного обладнання, є фізичне моделювання.

Дослідження проводилися в спеціально виготовленому експериментальному зразку установки, який повністю відтворює умови роботи натурної установки за геометричними параметрами та системою подачі повітря. Основна відмінність полягала в тому, що експерименти проводилися без нагрівання теплоносія (повітря) та за допомогою нерухомої робочої лінії. Матеріал, що досушувався, розташовувався на горизонтальній робочій лінії у вигляді тонкого шару і обдувався вертикальними повітряними струменями.

Для оцінки рівномірності поля швидкостей використовувався термоанемометричний метод вимірювань. Одночасно зі значеннями середньої в часі швидкості метод дозволяє визначити величину поздовжніх пульсацій, які істотно впливають на інтенсивність процесів тепломасопереносу.

На основі локального контролю результатів вимірювань у характерних зонах робочого простору установки було розроблено заходи, спрямовані на підвищення рівномірності полів швидкості потоку за рахунок конструктивних змін у системі подачі повітря. При виконанні роботи було реалізовано вісім модифікацій, що відрізняються як конструктивними особливостями, так і обсягом отриманої інформації.

У результаті проведених заходів для покращення аеродинамічних характеристик системи подачі теплоносія вдалося досягти оптимальних значень середньої швидкості та її коефіцієнта нерівномірності, які забезпечують необхідну якість обробки матеріалу.

Ключові слова: *удосконалена система подачі теплоносія, локальні аеродинамічні характеристики*

Актуальність. Нині енергозберігаючі технології знаходять широке застосування в різних технологічних процесах, зокрема, процесах сушіння. Енергозбереження досягається різними шляхами, у тому числі за рахунок вторинної переробки відходів вихідного продукту. Наприклад, використання висушених рослинних відходів як додаткових продуктів для харчової, фармацевтичної та тютюнової промисловості є важливим фактором енергозбереження.

У статті описана технологія досушування фрагментів відходів рослинної сировини з подальшим технологічним кондиціонуванням, яка здійснюється в конвеєрній однарусній сушильній установці шляхом вертикального продування теплоносія в тонкому шарі матеріалу, що обробляється.

Одним з критеріїв забезпечення високої якості продукту є організація оптимального потокорозподілення теплоносія по всій робочій лінії за наявності шару фрагментів сировини, що піддаються обробці. Значна роль в організації такого потокорозподілення відводиться системі подачі теплоносія, що у цьому випадку була утворена рядами щілин. Інтенсивність процесу тепломасообміну визначається саме параметрами системи подачі теплоносія (швидкістю і температурою), а також умовами обтікання шару продукту, що висушується.

Організація оптимального розподілу потоку теплоносія здійснювалася з використанням локального підходу, прийнятого в ІТТФ НАН України [1]. Основними параметрами, що характеризують розподіл потоку, є абсолютні значення середньої швидкості і ступінь нерівномірності локального поля швидкості в характерних точках робочої зони. Значення цих параметрів встановлюються на основі попередньої оцінки інтенсивності тепломасообміну з урахуванням верхньої межі швидкості, що забезпечує високу якість оброблюваного матеріалу. Для цієї установки рекомендовані значення $U \sim 0,5-0,8$ м/с з допустимим ступенем нерівномірності 0,6-1,8.

Незважаючи на те, що проектуванню установки передують аеродинамічний розрахунок системи подачі теплоносія, вплив елементів конструкції установки на

гідродинамічну структуру потоку враховано недостатньо. Як наслідок, на практиці спостерігаються відхилення від результатів розрахунків.

Одним з найбільш перспективних методів для вивчення процесів переносу, що відбуваються в складних умовах, є фізичне моделювання [2]. Тому перед введенням установки в експлуатацію проводяться випробування на дослідному зразку, під час яких усуваються виявлені недоліки.

На основі аналізу отриманих експериментальних даних були розроблені конкретні заходи щодо удосконалення системи подачі теплоносія, внаслідок здійснення яких вдалося суттєво покращити конструкцію установки та забезпечити необхідні параметри поточкорозподілення.

Вирішенню актуального завдання покращення аеродинамічних характеристик процесу досушки на основі локального підходу сприяють представлені нижче експериментальні результати.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Однією з поширених технологій сушіння є використання системи струменів. Імпактні струмені часто використовуються в промисловості для сушіння, охолодження або нагрівання різних продуктів. Імпактні струмені особливо поширені для сушіння та охолодження безперервних листів, таких як папір, текстиль та метали. Наприклад, результати, описані в [3] для механізму теплопередачі при ударі щілинного струменя, сприяють оптимізації обладнання і отриманню контрольованих параметрів промислової технології охолодження гарячої сталевий смуги/листа.

В Інституті технічної теплофізики (ІТТФ) НАН України розроблена інша технологія сушіння із застосуванням системи струменів. Ця технологія використовується для досушування фрагментів відходів рослинної сировини з подальшим технологічним кондиціонуванням. У процесі досушування відбувається нагрівання матеріалу та його зневоднення за рахунок енергії, що надходить від теплоносія (підігрітого повітря). У процесі технологічного кондиціонування здійснюється подальше зневоднення матеріалу за рахунок віддачі його внутрішньої енергії, завдяки чому досягається ефективне охолодження матеріалу і вирівнювання його вологовмісту.

На основі відомих літературних даних про потоки струменів [4] було проведено попередній розрахунок системи плоских струменів. У результаті були оцінені аеродинамічні характеристики системи подачі теплоносія, а саме, поле швидкостей та його нерівномірність. Проте обмеженість такого підходу очевидна, тому що недостатньо враховується вплив конфігурації і розмірів елементів системи подачі теплоносія та їх розташування на гідродинамічну структуру потоку. У зв'язку з цим введенню установки в експлуатацію має передувати етап аеродинамічних випробувань, умови яких максимально наближені до натурних. У ході цих випробувань повинні бути виявлені та усунуті основні причини відхилень параметрів від розрахункових.

Мета дослідження – розроблення методів покращення аеродинамічних характеристик системи підводу теплоносія на основі локального контролю теплофізичних параметрів у характерних зонах робочого середовища.

Матеріали та методи дослідження. У цьому розділі представлено короткий опис конструкції експериментального зразка, спеціально виготовленого для аеродинамічного удосконалення установки досушування та технологічного кондиціювання відходів рослинної сировини. Експериментальний зразок за геометричними параметрами та системою підводу повітря повністю відтворює умови експлуатації установки. Основна відмінність в тому, що експерименти проводилися без підігрівання теплоносія (повітря) при нерухомій робочій лінії, що являє собою тонку металеву пластину, перфоровану отворами діаметром 4 мм та розміщену горизонтально (рис.1). Оброблюваний матеріал розташовувався на робочій лінії у вигляді тонкого шару та обдувався вертикальними повітряними струменями, що витікають із системи поздовжніх щілин. Повітророзподільний короб складався з двох частин: вхідної та основної, де були розміщені щілини. Конфузорність обох частин короба мала забезпечити подачу необхідної кількості повітря до периферії, тобто до останніх рядів і до кінця всіх рядів щілин. Всього на поверхні розподільного короба площею $1.5 \times 2 \text{ м}^2$ було розміщено 33 ряди щілин. Робоча лінія, набрана з перфорованих пластин, встановлювалася над усіма рядами щілин на відстані 150 мм від їх виходу. Для поліпшення змішування струменів за

щілинами на відстані 20 мм розташовувалося 33 циліндричні стрижні діаметром 8 мм.

У початковому варіанті установки ширина щілин становила ~5 мм. Конструкція щілин дозволяла автономне регулювання її ширини в широких межах (від 3 до 14 мм) для забезпечення необхідної витрати через кожну щілину. На рис. 1 позначено також напрямки відліку систем координат x та z . Відлік координати y проводився у вертикальному напрямі, тобто у напрямку руху струменів, що витікають із щілин.

Для зручності точки вимірювань (всього 41 точка) було обрано над непарними рядами (рис.1).

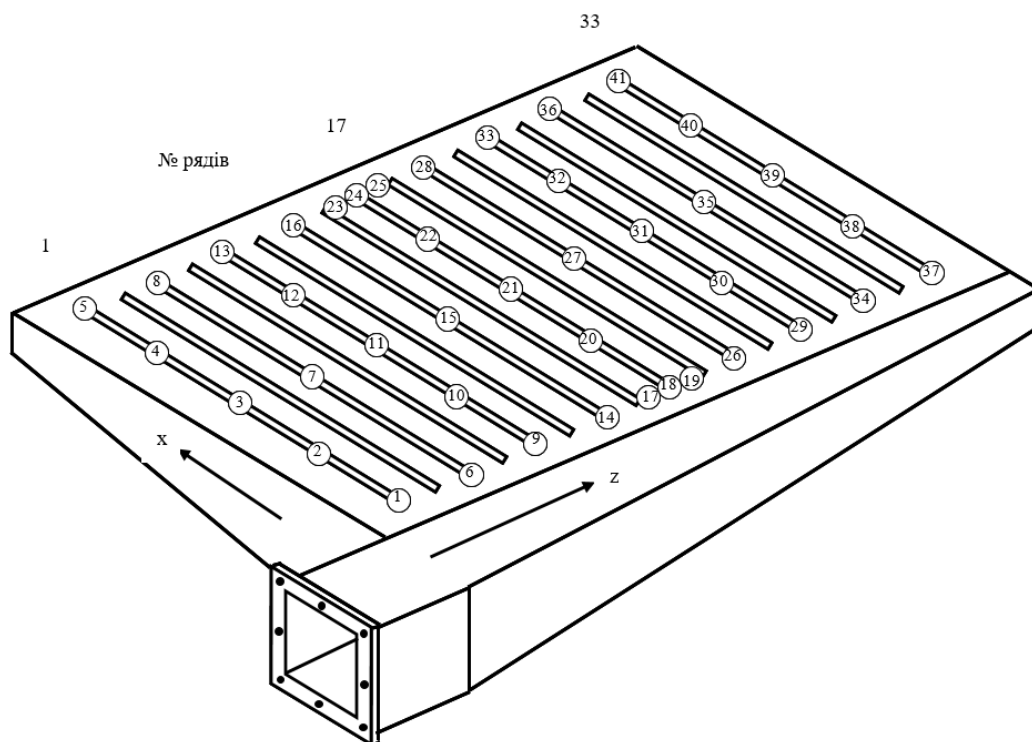


Рис. 1. Схема експериментальної установки з позначенням рядів щілин та точок вимірів

Для оцінки однорідності поля швидкості потоку використовувався термоанемометричний метод вимірювання. Такий метод зазвичай застосовується для вивчення структури складних течій у широкому діапазоні швидкостей [5], починаючи з 0,1 м/с, як це було в цій установці. Калібрування датчиків термоанемометрів проводилося на спеціальному низькошвидкісному калібрувальному пристрої, розробленому в ІТТФ НАН України. Цей пристрій дозволяє калібрувати в діапазоні швидкостей від 0,1 м/с. Одночасно зі значеннями

середньої в часі швидкості (U , м/с) метод термоанемометрії дозволяє визначити величину поздовжніх пульсацій (u'/U , %), які, як відомо [6], істотно впливають на інтенсивність тепломасообмінних процесів.

Датчик термоанемометра встановлювався у спеціальному координатному пристрої, що дозволяв здійснювати його переміщення по координатних осях та встановлювати у вибраній точці вимірювального простору.

Результати досліджень та їх обговорення. Аналіз результатів вимірювань з використанням локального підходу дав повну картину просторової нерівномірності потоку в усьому вимірювальному просторі. На основі локального контролю можна було розробити та провести заходи, спрямовані на підвищення рівномірності полів швидкості потоку за рахунок конструктивних змін у системі подачі повітря.

Всього було випробувано вісім модифікацій установки, які відрізняються як конструктивними особливостями, так і обсягом отриманої інформації, та розроблено конкретні заходи щодо удосконалення системи подачі теплоносія.

Для оцінки нерівномірності поля швидкості було введено так званий коефіцієнт нерівномірності k , що представляє відношення локальної швидкості в даній точці U до середньої швидкості $U_{\text{ср}}$:

$$k = U/U_{\text{ср}}, \quad (1)$$

де значення $U_{\text{ср}}$ визначалися за даними n – вимірювань:

$$U_{\text{ср}} = \sum_1^n U/n \quad (2)$$

Для отримання загального уявлення про первинну нерівномірність розподілу потоку системи подачі повітря використовувалися результати вимірювань модифікації 1, тобто початкового варіанту конструкції.

Як очевидно з аналізу даних, представлених на рис. 2, поле швидкостей характеризувалося значною нерівномірністю як по всім щілинам ($z = \text{var}$), так і по довжині кожної щілини ($x = \text{var}$).

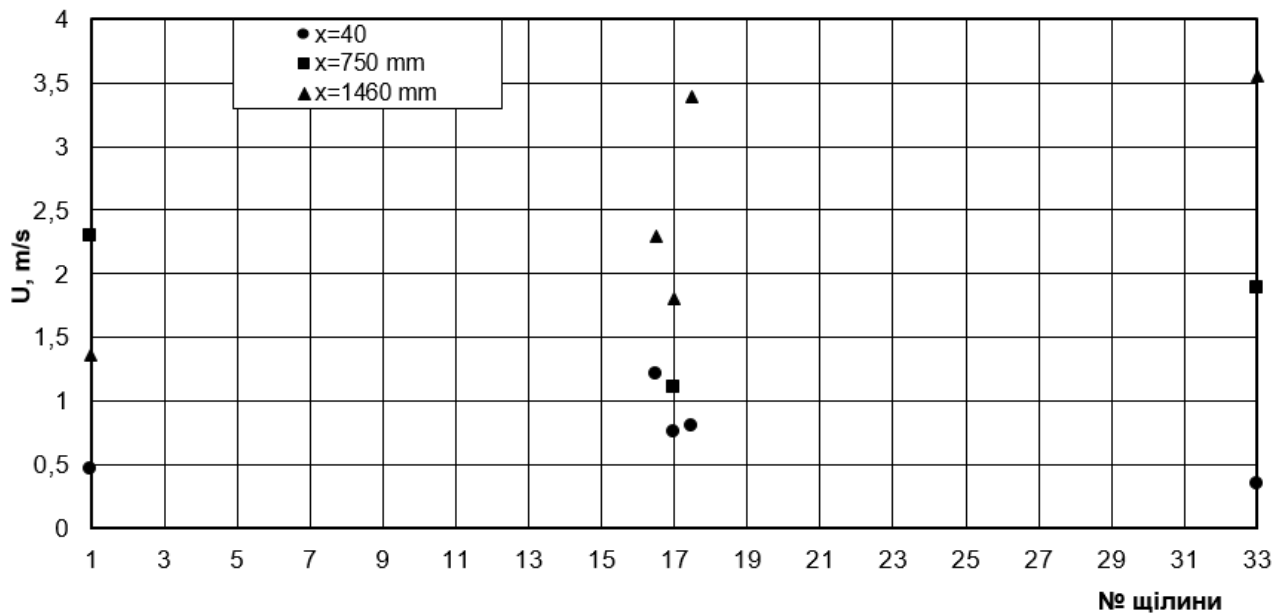


Рис. 2 Поле швидкостей в модифікації 1

Зокрема, відмінність швидкостей з обох боків від центральної 17-ої щілини свідчили про поширення центрального струменя під деяким кутом до робочої лінії, що може бути викликано як конструкцією самої щілини, так і впливом встановленого за нею циліндра. На основі аналізу проведених вимірювань було зроблено такі основні висновки:

- розподіл швидкостей відрізняються нерівномірністю, про що свідчить зміна k в межах одного порядку;
- загалом більш високі значення швидкостей спостерігаються на периферії (тобто в останньому ряду та в кінці рядів).

Таким чином, на основі локального підходу було підтверджено, що початкова конструкція установки не відповідає оптимальним параметрам системи подачі теплоносія. Експериментальні дані про нерівномірність поля швидкостей стали основою цілеспрямованих заходів щодо вдосконалення установки, які проводились послідовно з обов'язковим контрольним вимірюванням аеродинамічних характеристик різних модифікацій установки.

Зокрема, збільшення швидкостей на периферії (тобто в останньому ряду і наприкінці всіх рядів) було пов'язане, перш за все, із значним стисканням потоку в конфузорах вхідної та основної частин розподільного короба. Оскільки його

конструкцію не можна змінити було вирішено усунути цей недолік, регулюючи ширину кожної щілини по довжині ряду. Загальна тенденція цього заходу полягає в тому, щоб розширити щілини на початку рядів для збільшення швидкості, і звужити щілини в кінці рядів, щоб зменшити її.

Ще одним заходом щодо поліпшення нерівномірності поля швидкостей стало часткове закриття щілин на кінцях рядів.

Було також діагностовано та ліквідовано витік повітря через неущільнені частини основного короба поблизу кінців першого і останнього рядів.

Наступним заходом для покращення аеродинамічних характеристик установки стала відмова від циліндричних стрижнів, які в початковому варіанті конструкції встановлювалися для поліпшення змішування струменів. Слід зазначити, що наявність стрижнів у системі подачі повітря призводить до:

- загального ускладнення системи подачі повітря;
- утруднює очищення щілин через попадання в них частинок рослинної сировини;
- стрижні створюють додатковий аеродинамічний опір;
- сприяють нестаціонарності течії та формуванню так званої вихрової доріжки Кармана;
- відсутність строгих правил кріплення стрижнів може призвести до викривлення траєкторії потоку.

Водночас орієнтовний розрахунок на основі літературних даних (див., напр., [4] та наявні там бібліографії) показує, що організована щілинами система плоских струменів на відстані 30 калібрів від виходу із щілин (тобто в місці розташування робочої лінії) створює поле швидкості з нерівномірністю $k \leq 2,4$ при максимальній швидкості 1.3 м/с для заданої продуктивності повітрорудки 5000 м³/год. Ці дані щодо нерівномірності поля швидкості та абсолютного значення останньої відповідають поточкорозподілу, необхідному для надійної роботи установки. Тому було вирішено вдосконалити конструкцію установки за рахунок ліквідації циліндричних стрижнів. Для підтвердження правильності цього заходу були проведені контрольні виміри за щілинами над робочою лінією за відсутності циліндричних стрижнів (модифікація 8). Результати вимірювань представлені нижче.

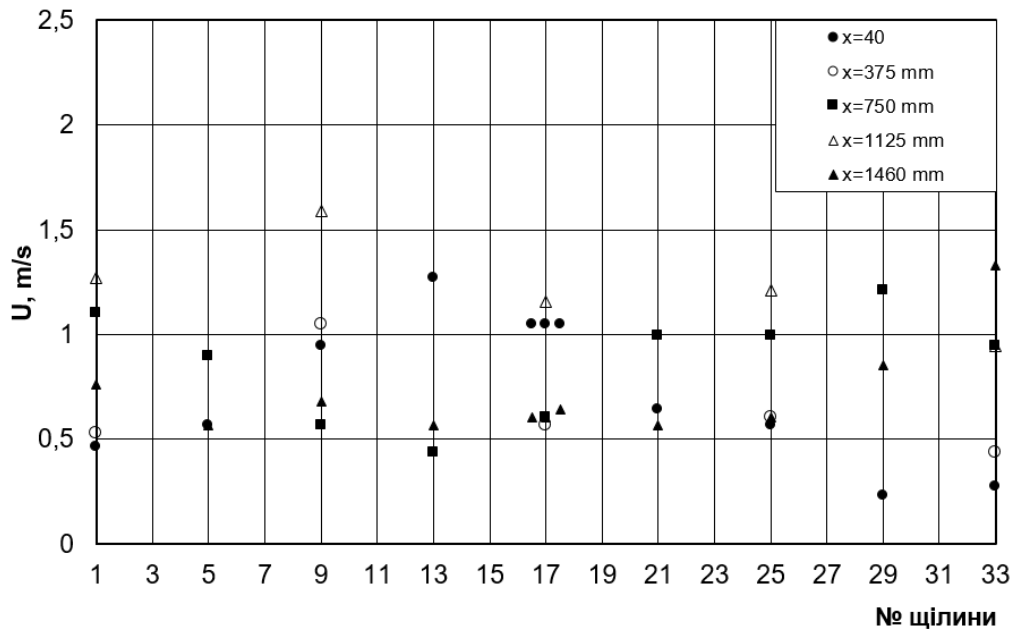


Рис. 3 Поле швидкостей у модифікації 8

У всьому вимірювальному об'ємі (рис. 3) коефіцієнт нерівномірності поля швидкостей k змінювався не більше, ніж $\sim 1,8$ при середній швидкості $U_{\text{ср}} = 0,77$ м/с. Таким чином, в модифікації 8 відносно початкового варіанту 1 спостерігалось значне покращання поля швидкостей як за рядами, так і за їх довжиною.

Порівняльний аналіз отриманих результатів з аналогічними даними у присутності стрижнів діагностує збільшення середньої швидкості до 35 % при незмінному коефіцієнті нерівномірності. Однак, це збільшення швидкості не переміщує матеріал з робочої лінії. Візуальні спостереження дозволяють зробити висновок, що в модифікації 8 досягнуті режими течії, які забезпечують якісну обробку матеріалу. Фрагменти рослинного матеріалу рухаються, трохи піднімаються над поверхнею робочої лінії, але практично не відриваються від неї і не виносяться потоком в навколишній простір.

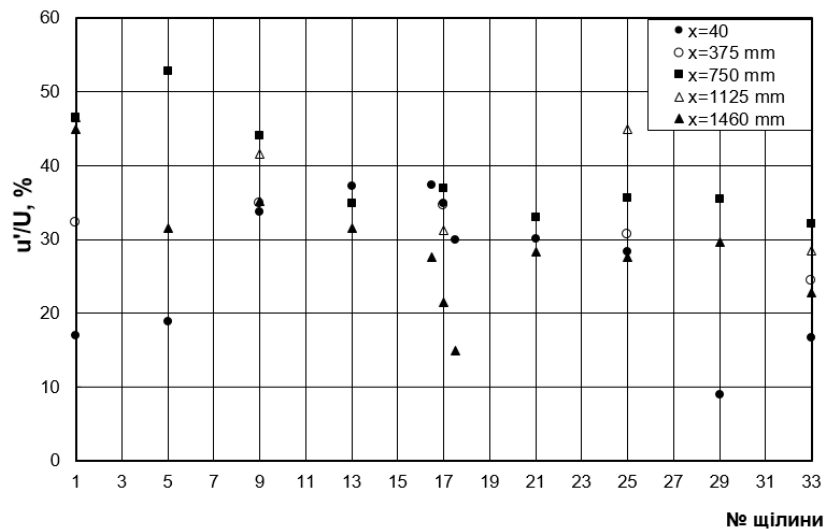


Рис. 4 Розподіл поздовжніх пульсацій у модифікації 8

Результати вимірювань також показали, що в модифікації 8 відбувається збільшення ступеня турбулентності потоку, що досягає в окремих точках $u'/U = 52\%$ при середньому рівні $\sim 30\%$ (рис. 4). Збільшення як середньої швидкості потоку теплоносія, так і його турбулентності сприяє інтенсифікації процесу тепломасоперенесення [6]. Це покращить якість виробу та скоротить час сушіння. Таким чином, на основі використання локального підходу для отримання оптимального розподілу потоку теплоносія були розроблені конкретні заходи щодо вдосконалення конструкції установки.

Висновки і перспективи. Доцільність використання локального підходу до управління процесами переносу у теплоенергетичному обладнанні різного призначення, розробленого в ІТТФ НАН України, була підтверджена і при аеродинамічних дослідженнях системи подачі теплоносія у технології досушування та технологічного кондиціювання рослинної сировини. За допомогою термоанемометричної методики оцінювалися значення середніх швидкостей та нерівномірності в розподілах локальних швидкостей, а також ступінь турбулентності у характерних точках робочого простору.

У роботі розглянуто результати аеродинамічних випробувань восьми модифікацій установки. Запропоновані конкретні заходи щодо вдосконалення конструкції системи подачі теплоносія, а саме:

- внесені суттєві зміни до розмірів щілин;

- на кінцях рядів ділянки щілин частково перекриті;
- мінімізовано витік у розподільчому коробі;
- усунуті ряди циліндричних стрижнів.

У результаті проведених заходів вдалося досягти оптимальних значень середньої швидкості $U_{\text{ср}} \sim 0,8$ м/с з коефіцієнтом нерівномірності $k = 0,6-1,8$, що забезпечує необхідну якість оброблення матеріалу без винесення фрагментів рослинних відходів за межі робочої лінії.

Впровадження вдосконаленої системи подачі теплоносія сприяє підвищенню його продуктивності при скороченні часу процесів сушіння та кондиціонування внаслідок інтенсифікації тепломасообміну за рахунок збільшення середньої швидкості високотурбулізованого потоку теплоносія.

Аеродинамічні випробування підтвердили необхідність проведення експериментів на дослідних зразках у натурних умовах перед введенням в експлуатацію конкретної установки. Такі експерименти дозволяють усунути наявні недоліки, відпрацювати раціональніший варіант конструкцій, забезпечити надійність установки в процесі експлуатації.

Список використаних джерел

1. Suprun T.T. Local approach for evaluating heat transfer of prismatic elements on a flat surface. Eurasian Physical Technical Journal. 2021. Vol.18, No. 3 (37). P. 43-47. DOI 10.31489/2021No3/43-47 https://up.ksu.kz/phtj/2021_19_1_37/7.pdf
2. Suprun T. T. Physical modeling the unsteady flow with wakes. Eurasian Physical Technical Journal. 2017. Vol.14, No. 2 (28). P. 113 - 119. http://phtj.ksu.kz/files_phtj/2018.01/19.pdf
3. Bingxing Wang, Zhixue Liu, Bo Zhang, Zhaodong Wang, Guodong Wang. Heat Transfer Characteristic of Slit Nozzle Impingement on High-temperature Plate Surface. ISIJ International. 2019. Vol. 59, Issue 5. P. 900-907 DOI <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-576>
4. Дыбан Е.П., Мазур А.И. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел: монография. Киев: Наукова думка, 1982. 303 с.
5. Брэшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение: монография. Москва: Мир, 1974. 345 с.
6. Epik E. Ya., Suprun T. T. Impulse and heat transport processes at bypass transition. Eurasian Physical Technical Journal. 2007. Vol.4, No.1(7). P.52-57.

References

1. Suprun, T. T. (2021). Local approach for evaluating heat transfer of prismatic elements on a flat surface. Eurasian Physical Technical Journal, 18/ 3 (37), 43-47. DOI 10.31489/2021No3/43-47 https://up.ksu.kz/phtj/2021_19_1_37/7.pdf

2. Suprun, T. T. (2017). Physical modeling the unsteady flow with wakes. Eurasian Physical Technical Journal, 14/2(28), 113 - 119. http://phtj.ksu.kz/files_phtj/2018.01/19.pdf
3. Bingxing, Wang, Zhixue, Liu, Bo, Zhang, Zhaodong, Wang, Guodong, Wang. (2019). Heat Transfer Characteristic of Slit Nozzle Impingement on High-temperature Plate Surface. ISIJ International, 59/5, 900-907 DOI <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-576>
4. Dyban, Ye.P., Mazur, A.I. (1982). Konvektivnyy teploobmen pri struynom obtekanii tel [Convective heat transfer in jet stream flow of bodies]. Kyiv: Naukova dumka, 303.
5. Bredshou, P. (1974). Vvedeniye v turbulentnost' i yeye izmereniye. [Introduction to turbulence and its measurement]. Moskow: Mir, 345.
6. Epik, E. Ya., Suprun, T. T. (2007). Impulse and heat transport processes at bypass transition. Eurasian Physical Technical Journal, 4/1(7), 52-57.

УЛУЧШЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ДОСУШКИ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОГО ПОДХОДА

Т. Т. Супрун

Аннотация. В современных условиях энергосберегающие технологии широко используются в различных технологических процессах, в частности, в процессах сушки. Энергосбережение достигается различными путями, в том числе за счет вторичной переработки отходов исходного продукта, в частности, высушенных растительных отходов.

Объектом данного исследования является система подвода теплоносителя установки для досушивания и кондиционирования отходов растительного сырья.

Цель работы – разработка методов улучшения аэродинамических характеристик системы подвода теплоносителя на основе локального контроля теплофизических параметров в характерных зонах рабочей среды.

Традиционным методом, применяемым в ИТТФ НАН Украины для изучения процессов переноса типичных для теплоэнергетического оборудования, является физическое моделирование.

Исследования проводились в специально изготовленном экспериментальном образце установки, полностью воспроизводящем условия работы натурной установки по геометрическим параметрам и системе подачи воздуха. Основное отличие заключалось в том, что эксперименты проводились без нагрева теплоносителя (воздуха) и с помощью неподвижной рабочей линии. Досушиваемый материал располагался на горизонтальной рабочей линии в виде тонкого слоя и обдувался вертикальными воздушными струями.

Для оценки равномерности поля скоростей использовался термоанемометрический метод измерений. Одновременно со значениями средней по времени скорости метод позволяет определить величину продольных пульсаций, которые оказывают существенное влияние на интенсивность процессов тепломассопереноса.

На основе локального контроля результатов измерений в характерных зонах рабочего пространства установки разработаны мероприятия, направленные на

повышение равномерности полей скорости потока за счет конструктивных изменений в системе подачи воздуха. При выполнении работы было реализовано восемь модификаций, отличающихся как конструктивными особенностями, так и объемом получаемой информации.

В результате проведенных мероприятий по улучшению аэродинамических характеристик системы подачи теплоносителя удалось добиться оптимальных значений средней скорости и ее коэффициента неравномерности, обеспечивающих необходимое качество обработки материала.

Ключевые слова: *усовершенствованная система подачи теплоносителя, локальные аэродинамические характеристики*

IMPROVING THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE DRYING PROCESS BASED ON THE LOCAL APPROACH

T. Suprun

Abstract. *In modern conditions, energy-saving technologies are widely used in various technological processes, including drying processes. Energy saving is achieved in various ways, including through the recycling of waste from the original product, in particular, dried plant waste.*

The object of this study is the coolant supply system of the installation for drying and technological conditioning of plant waste.

The purpose of the work is to develop methods for improving the aerodynamic characteristics of the coolant supply system based on local control of thermophysical parameters in characteristic zones of the working environment.

Physical modeling is a traditional method used in IET NAS of Ukraine to study the transfer processes typical for heat power equipment.

The research was carried out in a specially made experimental sample of the installation, which completely reproduces the operating conditions of the full-scale installation in terms of geometric parameters and air supply system. The main difference was that the experiments were performed without heating the coolant (air) and using a fixed working line. The material to be dried was placed on a horizontal working line in the form of a thin layer and was blown by vertical air jets.

To assess the uniformity of the velocity field, the hot-wire method of measurements was used. Simultaneously with the values of the time-averaged velocity, the method makes it possible to determine the value of longitudinal fluctuations, which have a significant effect on the intensity of heat and mass transfer processes.

Based on the local control of the measurement results in the characteristic zones of the working space of the installation, measures were developed aimed at improving the uniformity of the flow velocity fields due to design changes in the air supply system. When performing the work, eight modifications were implemented, differing both in design features and for information received.

Because of the measures taken to improve the aerodynamic characteristics of the coolant supply system, it was possible to achieve optimal values of the average velocity and its non-uniformity coefficient, which ensure the required quality of material processing.

Key words: *improved coolant supply system, local aerodynamic characteristics*