

## MODERNIZATION OF THE EXPERIMENTAL STAND FOR STUDYING THE DRYING PROCESS OF SINGLE DROPS OF LIQUID SYSTEMS

N. Sharkova, T. Turchyna, E. Zhukotsky, L. Kostyanets

*Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine*

---

**Key words:**

*Experimental stand  
Drop drying process  
Digital temperature recorder  
Digital microscope*

**Article history:**

Received 12.05.2017  
Received in revised form  
08.06.2017  
Accepted 19.06.2017

**Corresponding author:**

N. Sharkova  
**E-mail:**  
npuht@ukr.net

---

**ABSTRACT**

The article presents the results of modernization of the experimental stand for the investigation of the drying process of liquid systems drops, which is based on the model of the “drop–steam–gas medium” system. The use of a digital temperature logger has ensured simultaneous recording of drop temperature in digital and graphical form in separate programs. A digital microscope provides the translation of a drop image onto a computer monitor and video recording of its drying process. Due to the software, the time for thermograms processing is reduced, and the kinetic characteristics of the drying process are obtained and analyzed. The use of digital technology and the software of the stand made it possible to raise the level of the research process, the quality of the scientific product and expand the prospects for further work.

**DOI:** 10.24263/2225-2924-2017-23-4-17

---

## МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ОДИНИЧНИХ КРАПЕЛЬ РІДИННИХ СИСТЕМ

Н.О. Шаркова, Т.Я. Турчина, Е.К. Жукотський, Л.О. Костянець

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

*У статті представлено результати модернізації експериментального стенду для дослідження процесу сушіння крапель рідинних систем, в основі якого закладено модель системи «крапля–парогазове середовище». Застосування цифрового реєстратора температури забезпечило одночасний запис температури краплі у цифровій і, відповідно, графічній формі в окремих програмах. Цифровий мікроскоп забезпечує трансляцію зображення краплі на монітор комп'ютера і відеозапис процесу її сушіння. За рахунок програмного забезпечення скорочується час на обробку термограм, отримання та аналіз кінетичних характеристик процесу сушіння. Застосування цифрової техніки та програмне забезпечення стенду забезпечило підвищення рівня дослідницького процесу, якість наукового продукту й розширення перспектив подальших досліджень.*

**Ключові слова:** експериментальний стенд, крапля, процес сушіння, цифровий реєстратор температури, цифровий мікроскоп.

**Постановка проблеми.** Створення нових енергоощадних технологій отримання порошкових продуктів і матеріалів методом розпилювального сушіння й організація їх промислового виробництва мають ґрунтуватись на знаннях кінетичних закономірностей процесу сушіння розчинів і суспензій.

Для проведення досліджень закономірностей процесу сушіння розчинів або суспензій багатокомпонентних рідинних систем у відділі тепломасообміну в дисперсних системах ІТТФ НАН України понад 40 років тому були створені унікальні експериментальні стенди, описані в [1; 3; 6], що являють собою модель системи «крапля–парагозове середовище», серед яких стенд для зневоднення одиначної краплі у потоці нагрітого теплоносія.

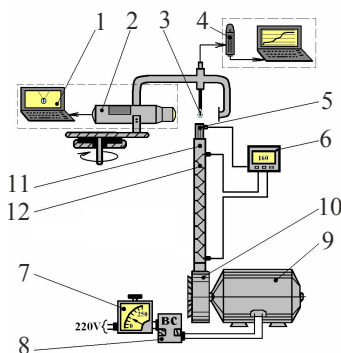
Над створенням цих стендів та методики проведення досліджень працювали видатні вчені сучасності: академік НАН України А.А. Долінський та д.т.н. К.Д. Малецька з колективом талановитих інженерів-механиків Г.Г. Мосейчуком, Г.В. Шидловським та ін.

З роками широкі можливості цих стендів змогли оцінити вчені, аспіранти та практиканти з різних регіонів країн СНГ, Польщі та Чехії, які вчилися проводили дослідження й отримували новий науковий досвід.

На сьогодні дослідження все нових об'єктів розпилювального сушіння вимагає сучасного підходу до питань збереження та модернізації таких унікальних стендів і вдосконалення методики проведення досліджень та обробки отриманих експериментальних даних.

**Мета статті** полягає в модернізації і переоснащенні стенду для дослідження процесу сушіння одиначних крапель рідинних систем у потоці нагрітого теплоносія й апробації його роботи в нових умовах технічного та програмного забезпечення.

**Викладення основних результатів дослідження.** На рис. 1 представлена схема експериментального стенду для дослідження процесу сушіння одиначних крапель рідинних систем у потоці нагрітого теплоносія в переоснащеному вигляді.



**Рис. 1.** Схема експериментального стенду для дослідження процесу сушіння одиначних крапель рідинних систем у потоці нагрітого теплоносія: 1 — монітор комп'ютера; 2 — цифровий мікроскоп; 3 — термопара для крапель; 4 — цифровий реєстратор температури краплі у комплекті з ПК; 5 — термопара контролю температури теплоносія; 6 — датчик-регулятор температури теплоносія; 7 — регулятор швидкості теплоносія; 8 — перетворювач струму; 9 — двигун; 10 — вентилятор; 11 — кварцева аеродинамічна труба; 12 — електронагрівач

Як показано на рис.1, проведена заміна кінокамери з чорно-білою кіноплівкою, обробка якої вимагала значних трудовитрат з її проявлення та визначення динаміки змінення розмірів крапель у процесі сушіння на спеціально призначеному для цього проекторі, на сучасний цифровий мікроскоп (2), функціональне призначення якого таке:

а) трансляція зображення спаю термопари (3) з краплею на монітор ПК (1) під час проведення різних операцій:

- навішування краплі на спай термопари;
- зневоднення краплі з усіма деформаційними проявами у стадії кипіння;
- вивчення стану висушеної частки на наявність термопластичних та адгезійних властивостей у потоці теплоносія і після її охолодження;
- видалення висушеної частки зі спаю термопари, очищення її і підготовка до наступного досліду;

б) проведення відеозйомки краплі у процесі сушіння і збереження відеоматеріалів на ПК.

Замість застарілого потенціометра, де запис термограм здійснювався на паперовій стрічці, яка вимагала трудомісної обробки та масштабування термограм вручну, на стенді встановлений цифровий реєстратор температури краплі (4), функціональне призначення якого таке:

а) автоматичний запис і накопичення цифрової інформації про змінення температури краплі в процесі її висушування;

б) завантаження збережених даних на ПК через USB-інтерфейс і спеціально розроблене програмне забезпечення, що працює від Windows 98, 2000, XP, Vista 7;

в) роздрукування або експонування збережених даних в інші додатки.

Для контролю температури теплоносія на виході з кварцової труби встановлено термопару (5), дані з якої передаються на датчик-регулятор (6). Решта стендового обладнання — у робочому стані і залишилась без змін.

Методика опрацювання отриманих даних за нових умов проведення досліджень передбачає, що відбір термограм проводиться після визначення того обсягу цифрових даних, в межах якого у файлі Datalogger Document спочатку вивчається характер термограм. Потім здійснюється розгортання, форматування у єдиному масштабі й роздрукування обраних термограм на паперовому носії для зручності їх чисельної обробки. За числовими даними, отриманими в результаті обробки термограм, у програмі Microsoft Excel будуються кінетичні залежності швидкості прогрівання крапель, тривалості окремих стадій процесу сушіння крапель та загального часу їх сушіння. За умов комп'ютерного масштабування та форматування підвищується точність порівняльного аналізу кінетичних характеристик процесу сушіння.

Апробація роботи переоснащеного стенду та корегування методики проведення досліджень проводились на розчинах крохмальної патоки ИГ-30, різного вмісту сухих речовин при температурах теплоносія: 140, 160, 180 і 200° С.

На рис. 2 представлено термограму сушіння краплі 45-відсоткового розчину крохмальної патоки ИГ-30 з визначеними критичними точками  $T_{кр2}$  і  $T_{кр3}$ , які поділяють термограму на окремі стадії. Як показав аналіз отриманих термограм, за їх характером перебіг процесу сушіння крапель крохмальної

патоки відбувається у другому високотемпературному періоді — періоді падаючої швидкості сушіння, який складається з трьох стадій:

- стадії кіркутворення — відрізок термограми від початку прогрівання краплі до точки  $T_{кр2}$ ;
- стадії кипіння — відрізок термограми  $T_{кр2}$  —  $T_{кр3}$ ;
- стадії досушування — відрізок термограми від точки  $T_{кр3}$  до виходу температури краплі на постійне значення  $T_k \approx T_n \approx \text{const}$ .

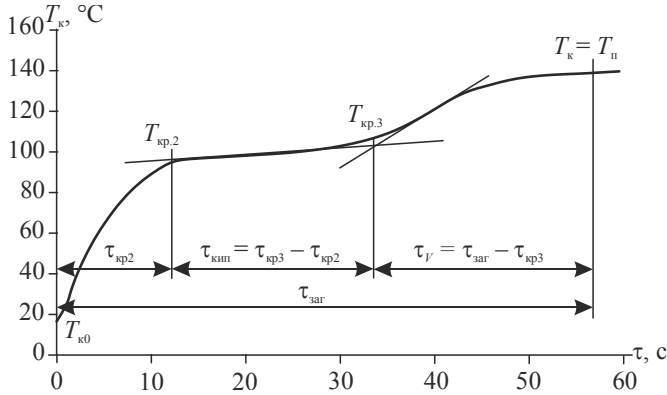


Рис. 2. Термограма сушіння краплі 45-відсоткового розчину крохмальної патоки у потоці нагрітого до температури 140°С теплоносія

Згідно з класифікацією матеріалів як об'єктів сушіння методом розпилювання [3], розробленої на основі кінетичних закономірностей процесу сушіння великої кількості різноманітних розчинів і суспензій, такий продукт відноситься до групи матеріалів III-3, для яких характерне:

- роздування крапель у стадії кипіння;
- подовження тривалості стадії досушування;
- отримання пустотних часток з розмірами більшими за початкові.

За результатами обробки термограм були отримані кінетичні залежності швидкості прогрівання крапель, відносної тривалості окремих стадій і загального часу їх сушіння від температури теплоносія та концентрації сухих речовин, що наведені на рис. 3 та 4.

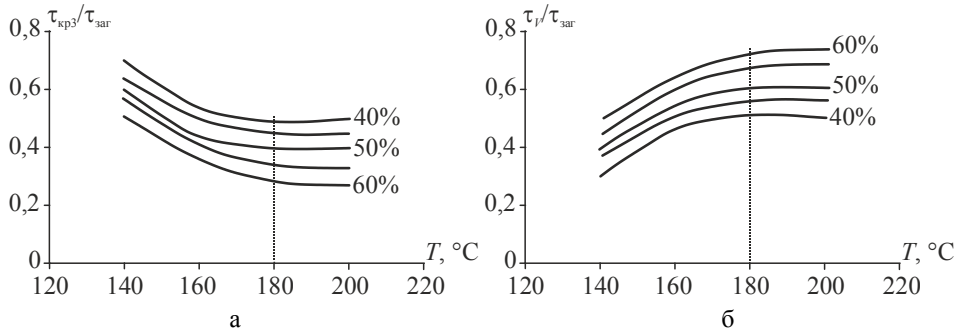
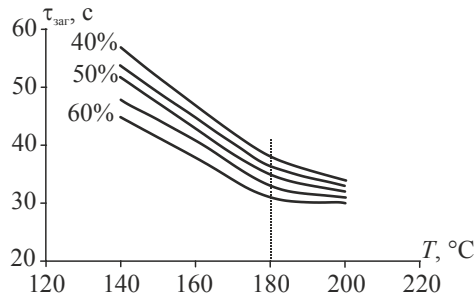
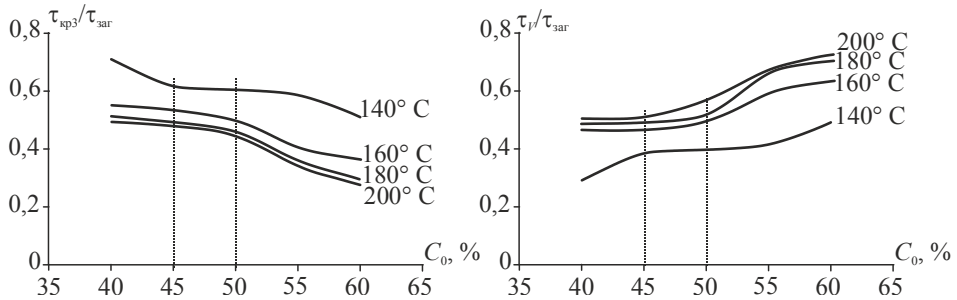


Рис. 3а,б. Кінетичні залежності, що характеризують вплив температури на процес сушіння крапель розчинів крохмальної патоки: а) відносної тривалості зневоднення краплі до точки  $T_{кр3}$ ; б) відносної тривалості стадії досушування



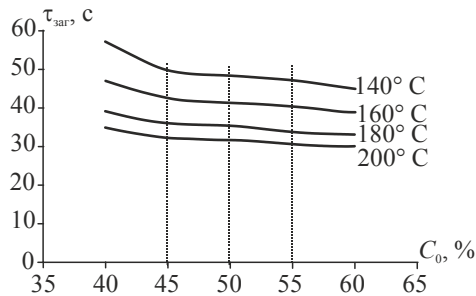
В

Рис. 3в. Кінетичні залежності, що характеризують вплив температури на процес сушіння крапель розчинів крохмальної патоки: в) загального часу сушіння



а

б



в

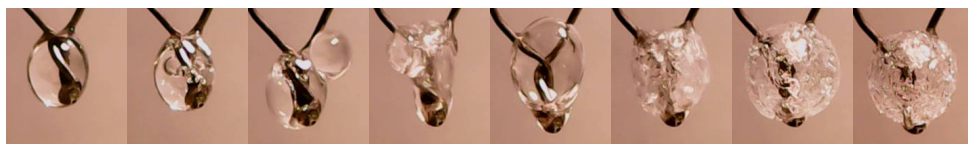
Рис. 4. Кінетичні залежності, що характеризують вплив вмісту сухих речовин на процес сушіння крапель розчинів крохмальної патоки: а) відносної тривалості зневоднення краплі до точки  $T_{крз}$ ; б) відносної тривалості стадії досушування; в) загального часу сушіння

Аналіз кінетичних залежностей, що характеризують вплив температури теплоносія на процес сушіння крапель розчинів крохмальної патоки, показує, що кращі умови для їх висушування досягаються при температурі теплоносія  $180^{\circ}\text{C}$ : тривалість процесу зневоднення до  $T_{крз}$  (рис. 3а) більше не скорочується, а стадії досушування (рис. 3б) — не збільшується, скорочення загального часу сушіння (рис. 3в) вже не відбувається.

Аналізуючи кінетичні залежності, що характеризують вплив вмісту сухих речовин на процес сушіння крапель патоки, можна стверджувати, що кращі

умови для їх висушування досягаються при вмісті сухих речовин у розчині  $\leq 50\%$ . При більшій концентрації зростає опір процесу вологопереносу з боку поверхневої кірочки, що призводить до скорочення тривалості процесу зневоднення крапель до  $T_{кр3}$  (рис. 4а) і збільшення тривалості стадії їх досушування (рис. 4б) за відсутністю впливу на загальний час сушіння (рис. 4в).

Для вивчення формо- та структуроутворення часток у процесі сушіння проводились візуальні спостереження та відеозйомка. На кінограмах сушіння крапель крохмальної патоки (рис. 5) при температурі теплоносія  $140^\circ\text{C}$  спостерігається багаторазове періодичне миттєве роздування крапель у стадіях кипіння та досушування, що обумовлює отримання часток порожнистої структури і більших за початкові розмірів, що збільшує ймовірність отримання при такій температурі теплоносія порошку з низькою насипною густиною.



а



б

**Рис. 5. Кінограми процесу сушіння крапель розчину крохмальної патоки ИГ-30 з вмістом сухих речовин 45% при температурі теплоносія а)  $140^\circ\text{C}$ ; б)  $180^\circ\text{C}$**

Збільшення насипної густини порошку і покращення його структурно-механічних характеристик можна досягти при температурі теплоносія  $180\text{—}200^\circ\text{C}$ , де, як видно з кінограм (рис. 5б), висушені частки мають більш щільну структуру, а розміри їх менші за початкові.

При виборі конструкції розпилювальної сушарки важливо знати, у якому стані перебувають висушені частки на виході з факелу розпилу в пристінній зоні сушильної камери. Як показали дослідження за допомогою цифрового мікроскопа, у потоці нагрітого теплоносія частки з 45-відсоткового розчину, висушені при температурі  $140^\circ\text{C}$ , при торканні металевим щупом (рис. 6а) були достатньо твердими з гладкою поверхнею, при зондуванні — пружними з ознаками незначної деформації і відсутності адгезійних властивостей.

Частки, отримані з 60-відсоткового розчину, не проявляли адгезійних ознак. Однак при зондуванні мали місце викиди бульбашок водяної пари (рис. 6б), що не припустимо через підвищення ймовірності погіршення структурно-механічних характеристик порошку, оскільки наявність вологи у частках призводить до агломерації та грудкування через когезійні явища при зберіганні такого порошку.



Рис. 6. Дослідження фізичного стану часток крохмальної патоки, висушених при температурі 140° С з розчинів: а)  $C_0 = 45\%$ ; б)  $C_0 = 60\%$

Частки патоки, висушені при температурі 160—200° С, незалежно від вмісту сухих речовин, проявляли термопластичні й адгезійні властивості (рис. 7).

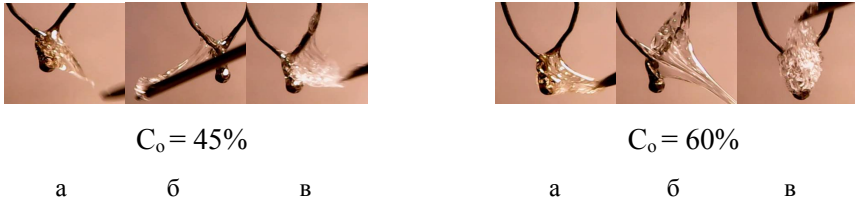


Рис. 7. Дослідження термопластичних та адгезійних властивостей часток крохмальної патоки, висушених при температурі теплоносія: а) 160° С; б) 180° С; в) 200° С

Встановлено, що при охолодженні всі частки незалежно від вмісту сухих речовин і температури теплоносія, при якій вони висушувались, різко ставали скловидними, майже прозорими, з твердою й міцною структурою і гладкою поверхнею, що має враховуватись при виборі конструкції розпилювальної сушарки для промислового виробництва сухої форми крохмальної патоки.

## Висновки

Апробація роботи модернізованого стенду для дослідження процесу сушіння одиничних крапель у потоці нагрітого теплоносія, яка проводилась на розчинах крохмальної патоки, показала, що застосування сучасної цифрової техніки та програмного забезпечення дають змогу підвищити рівень дослідницького процесу, якість наукового продукту й розширити перспективи подальших досліджень.

## Література

1. Долинский А.А. Оптимизация процессов распылительной сушки / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий. — Киев : Наукова думка. — 1984. — 320 с.
2. Brinkhorsta S. Experimental and numerical investigation of the cavitation-induced choked flow in a herschel venturi-tube / S. Brinkhorsta, E. von Lavantea, G. Wendtb // Flow Measurement and Instrumentation. — 2017. — Vol. 54 — P. 56—67.
3. Долинский А.А. Кинетика и технология сушки распылением / А.А. Долинский, К.Д. Малецкая, В.В. Шморгун. — Київ : Наукова думка, 1987. — 224 с.
4. Yegin B. Lipid nanocapsule size analysis by hydrodynamic chromatography and photon correlation spectroscopy // B. Yegin, A. Lamprecht // International Journal of Pharmaceutics. — 2006. — № 320. — P. 165—170.
5. Henk G. Merkus. Particle Size Measurements. Fundamentals, Practice, Quality. — Springer, 2009. — 533 p.
6. Долинский А.А. Распылительная сушка: В 2-х т. Т. 1 Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения / А.А. Долинский, К.Д. Малецкая. — Киев : Академперіодика, 2011. — 376 с.