

PACS numbers: 47.61.-k, 61.43.Gt, 68.37.Hk, 81.05.Rm, 81.20.Ev, 83.80.Fg, 89.20.Kk

Фінальне сушіння гранул аміячної селітри з нанопористою структурою в багатоступеневих поличних апаратах: конструктивне виконання та технологічні параметри

Н. О. Артюхова¹, Я. Крмела², В. Крмелова²

¹*Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2,
40007 Суми, Україна*

²*Тренчинський університет Александра Дубчека,
вул. І. Краску, 491/30,
02001 Пухов, Словаччина*

Статтю присвячено експериментальному дослідженню процесу фінального сушіння гранул пористої аміячної селітри (ПАС). Обґрунтовано застосування стадії фінального сушіння в загальній технологічній лінії одержання гранул ПАС з нанопористим поверхневим шаром або багатшарових гранул ПАС з нанопористою структурою. Описано основні переваги багатоступеневого сушіння у застосуванні до процесу формування нанопористої структури на поверхні гранули ПАС. Запропоновано інструмент автоматизованого розрахунку гідродинамічних і термодинамічних умов реалізації стадії фінального сушіння. Оцінено вплив часу перебування гранули ПАС в об'ємі сушарки, характеристик сушильного агента та ступеня стиснення потоку (відношення об'ємів гранул ПАС у робочому просторі сушарки та загального об'єму апарату) на характер нанопористої структури гранули («механічну» чи «модифікаційну» природу пор). Представлено результати мікроскопії гранул ПАС після кожного з трьох ступенів фінального сушіння (гранули були зволожені розчином аміячної селітри та пройшли стадію термооброблення у вихровому грануляторі), у тому числі в режимах недостатнього, оптимального та завищеного часу перебування гранули у сушарці. Встановлено вплив ступеня стиснення потоку на якість нанопористої структури гранул ПАС. Визначено особливості зміни нанопористої структури гранули та її специфічних властивостей (утримувальної та вбирної здатностей, відносної площі нанопористої поверхні, площі нанопористої поверхні в одиниці маси гранули ПАС) після кожного зі ступенів фінального сушіння. Результати досліджень уможливили визначити оптимальний час і температурний режим фінального сушіння, а також встановити максимальне навантаження сушильного апарату гранулами ПАС (максимальний ступінь стиснення потоку), за яких

гранули ПАС практично не мають «механічних» пор.

The article deals with the experimental study regarding the final drying process of porous ammonium nitrate (PAN) granules. The final drying stage implementation in the general technological line to obtain PAN granules with nanoporous layers or multilayer PAN granules with porous structure is substantiated. The main advantages of multistage drying in applying to the nanoporous-structure formation process on the PAN granules are described. The tool for the automated calculation of the hydrodynamic and thermodynamic conditions to carry out the final drying stage is proposed. The influence of the PAN-granules' residence time within the dryer workspace, the drying agent features, and the degree of flow compression (i.e., the ratio of the PAN-granules' volumes within the dryer workspace and the total space of the device) on the nature of the nanoporous structure of the granules (i.e., 'mechanical' or 'modified' nature of the pores) is evaluated. The results of PAN-granules' microscopy after the three stages of final drying are represented (the granules are humidified with ammonium nitrate solution and are heat treated in a vortex granulator), including in the modes of insufficient, optimal, and excessive residence time for the granules. The influence of flow compression degree on the quality of the nanoporous structure in PAN granules is established. The peculiarities of changes of nanoporous granule structure and its specific properties (namely, retentivity and absorptivity, relative area of nanoporous surface, area of nanoporous surface per mass unit of PAN granule) after each stage of final drying are determined. The findings of investigations allow to determine the optimal time and temperature of final drying process as well as to establish the maximum load of the dryer with PAN granules (maximum degree of flow compression), under which PAN granules have no 'mechanical' pores.

Статья посвящена экспериментальному исследованию процесса финальной сушки гранул пористой аммиачной селитры (ПАС). Обосновано применение стадии финальной сушки в общей технологической линии получения гранул ПАС с нанопористым поверхностным слоем или многослойных гранул ПАС с нанопористой структурой. Описаны основные преимущества многоступенчатой сушки в применении к процессу формирования нанопористой структуры гранулы ПАС. Предложен инструмент автоматизированного расчёта гидродинамических и термодинамических условий реализации стадии финальной сушки. Оценено влияние времени пребывания гранулы ПАС в объёме сушилки, характеристик сушильного агента и степени стеснённости потока (отношения объёма гранул ПАС в рабочем пространстве сушилки и общего объёма аппарата) на характер нанопористой структуры гранулы («механическую» или «модификационную» природу пор). Представлены результаты микроскопии гранул ПАС после каждой из трёх ступеней финальной сушки (гранулы были увлажнены раствором аммиачной селитры и прошли стадию термообработки в вихревом грануляторе), в том числе в режимах недостаточного, оптимального и повышенного времени пребывания гранулы в сушилке. Установлено влияние степени стеснённости потока на качество нанопористой структуры гранул ПАС.

Определены особенности изменения нанопористой структуры гранулы и специфических свойств (удерживающей и поглощающей способностей, относительной площади нанопористой поверхности, площади нанопористой поверхности в единице массы гранулы ПАС) после каждой из ступеней финальной сушки. Результаты исследований позволили определить оптимальное время и температурный режим финальной сушки, а также установить максимальную нагрузку сушильного аппарата по гранулам ПАС (максимальную степень стеснённости потока), при которых гранулы ПАС практически не имеют «механических» пор.

Ключові слова: пориста аміячна селітра, нанопориста структура, вихровий гранулятор, технологія.

Key words: porous ammonium nitrate, nanoporous structure, vortex granulator, technology.

Ключевые слова: пористая аммиачная селитра, нанопористая структура, вихревой гранулятор, технология.

(Отримано 4 грудня 2019 р.)

1. ВСТУП

Гранули аміячної селітри є необхідним компонентом промислових вибухових речовин у суміші з дистилатом дизельного палива (ANFO) [1–4]. Завдяки відносній дешевизні такий тип промислової вибухової речовини уможливорює проводити широкий спектр вибухових робіт у гірничодобувній промисловості [5]. Зазначимо, що найпоширенішим способом створення розвиненої пористої структури гранул аміячної селітри є додавання у розтоп пороутворювальних і модифікувальних добавок із подальшою кристалізацією цього розтопу [6]. Цей спосіб пов'язаний із погіршенням екологічних умов в зоні виробництва та в регіоні в цілому [7].

Процес формування нанопористої структури на поверхні та всередині гранули аміячної селітри способом зволоження з наступним термообробленням (як запропоновано в роботі [8]) супроводжується видобуванням парів води з поверхні гранул (перший період сушіння — постійна швидкість зневоднення) та з її внутрішніх шарів (другий період сушіння — спадна швидкість зневоднення) [9, 10]. У загальному вигляді процес формування нанопористої структури гранули можна представити у вигляді послідовності «зволоження–термооброблення 1 (формування нанопористої поверхні)–термооброблення 2 (формування внутрішньої мережі нанопор)». Перші дві стадії (як запропоновано в роботах [11, 12]) з високою ефективністю можна проводити в вихрових грануляторах, третю стадію (в разі необхідності) — в су-

шильних апаратах з різною конфігурацією псевдозрідженого шару [13]. Третя стадія одержання нанопористої структури у вихрових ґрануляторах може не мати достатню ефективність, а також не завжди є доцільною, як буде показано нижче.

Одержання рівномірної (по всій поверхні ґранули) та розвиненої (в приповерхневих і глибинних шарах, виключаючи ядро ґранули, яке має бути непористим і зберігати нормативні показники міцності) можливе в разі застосування вихрового ґранулятора в певному діапазоні відносного вмісту ґранул в апараті (ступеня стиснення потоку). У вихрових ґрануляторах із високою питомою продуктивністю (високим ступенем стиснення потоку $\varphi = 0,4-0,5$) можуть бути дефекти нанопористої структури, які пов'язані з:

- тривалим і нерівномірним контактом ґранул з гарячим теплоносієм і внаслідок цього виникненням істотних температурних напружень — утворенням тріщин («механічних» пор) всередині ґранули, великої кількості прямих макропор (до 500 нм) і нерівномірної пористої структури на поверхні;
- інтенсивним зіткненням ґранул між собою та стінками апарату внаслідок високого ступеня турбулізації потоку теплоносія — відколів, каверн і тріщин на поверхні ґранули.

Уникнути зазначених вище дефектів нанопористої структури ґранули можливо при зменшенні часу контакту ґранули з потоком високотемпературного теплоносія в вихровому ґрануляторі. В такому випадку в цьому апараті буде фактично відбуватися формування нанопористої поверхні в першому періоді сушіння. Для реалізації повного циклу одержання пористої ґранули необхідне зменшення продуктивності ґранулятора.

Кінцеве значення вбирної здатності ґранул ПАС (специфічний показник, який характеризує ступінь проникнення дистилляту дизельного палива в нанопори) може бути підвищено за рахунок більш інтенсивної сушки в період спадної швидкості (другий період сушіння — відповідно до прийнятої термінології; див. рис. 1). Здійснити цей процес при тривалому сушінні в вихровому потоці сушильного агента можливо лише при зниженні показника міцності ґранули. Для повного завершення процесу сушіння потрібен більший час оброблення, а ґранула через активну турбулізацію потоків може зруйнуватися. Утримувальна здатність теж знижується через руйнування і утворення «механічних» пор (розломів і тріщин).

Ґранули ПАС з надлишковою кінцевою вологістю характеризуються такими властивостями:

- недостатньо розвинена нанопориста структура;
- велика кількість «механічних» пор, які мають прямолінійну конфігурацію;

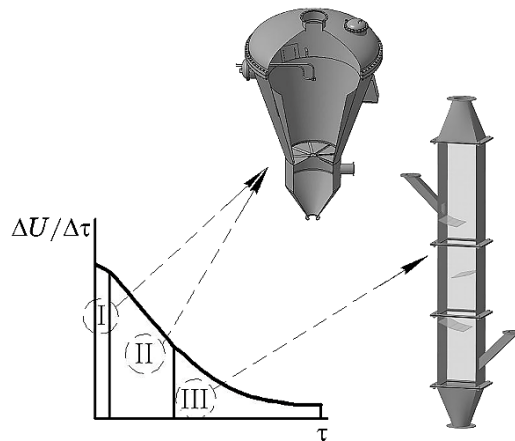


Рис. 1. Періоди сушіння гранули ПАС: I — прогрів гранули; II — період постійної швидкості сушіння; III — період спадної швидкості сушіння.¹

— неміцне ядро гранули (внаслідок наявності в гранулі значної кількості «механічних» пор);

— переважна наявність прямолінійних макропор у нанопористій структурі гранули, що пояснюється високою інтенсивністю видалення вологи в періоді зростаючої швидкості сушіння (прогрів матеріалу та перший період сушіння — відповідно до прийнятої термінології).

Додаткова стадія фінального сушіння (досушування) в режимі спадної швидкості в активному (але менш турбулізованому) гідродинамічному режимі уможливить досягти таких змін у нанопористій структурі гранул (в порівнянні з недосушеним зразком):

- збільшення кількості мезопор криволінійної конфігурації;
- збільшення частки криволінійних макропор у загальній кількості нанопор;
- збільшення глибини поверхневих нанопор.

Ці зміни уможливають збільшити показник утримувальної здатності гранул і часу надійного утримання дистилляту дизельного палива в гранулі.

У даній роботі пропонується введення в наявну технологічну схему одержання ПАС додаткової стадії багатоступінчастого фінального сушіння (досушування) в диференційованому режимі (параметри сушильного агента та висушуваних гранул змінюються на кожному ступені досушування) (рис. 2). В якості основного технологічного обладнання на цій стадії пропонується використання гравітаційних поличних сушарок, які добре зарекомендували себе в технології сушіння пористих концентратів у гірничо-

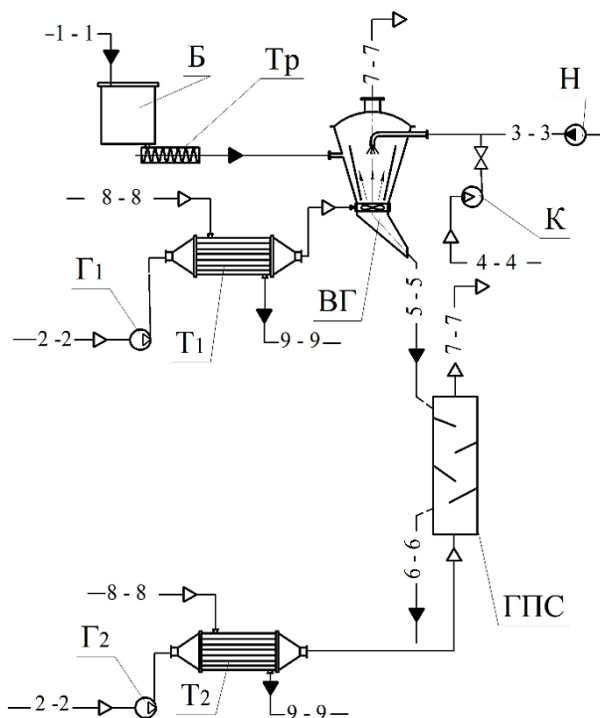


Рис. 2. Технологічна схема виробництва ПАС (ділянка зволоження та термооброблення). Елементи ділянки: ВГ — вихровий гранулятор; ГПС — гравітаційна полична сушарка; Т — теплообмінник; Г — газодувка; Н — насос; К — компресор; Тр — транспортер; Б — бункер. Потoki: 1-1 — ретур (гранули рядової ам'ячної селітри); 2-2 — теплоносій (технологічне повітря); 3-3 — зволожувач; 4-4 — повітря для диспергування зволожувача; 5-5 — гранули на фінальне сушіння; 6-6 — гранули на пакування; 7-7 — відпрацьований теплоносій; 8-8 — пара; 9-9 — водяний конденсат.²

добувній промисловості [14].

Отже, для середньотоннажних і великотоннажних установок одержання ПАС стадія фінальної сушки з опціональною перетворюється в обов'язкову. Видалення зв'язаної вологи з внутрішніх шарів гранули є обов'язковою умовою формування розвиненої мережі криволінійних мікропор для успішного утримання дистилату дизельного палива (компоненти промислової вибухової речовини).

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА

В рамках науково-дослідних робіт «Дослідження гідродинаміч-

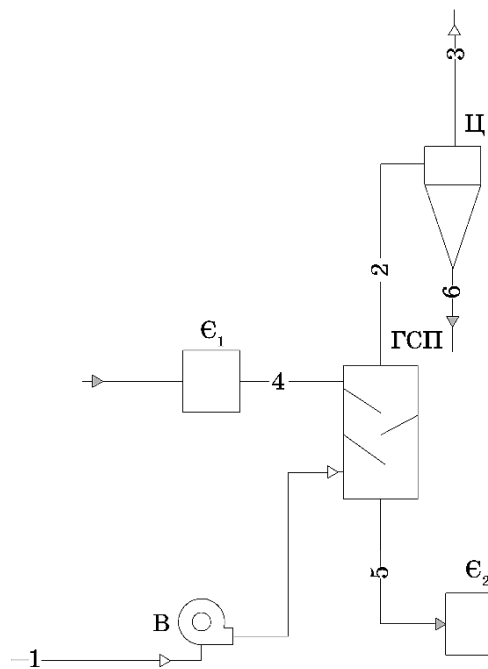


Рис. 3. Схема експериментального станда: ГПС — гравітаційна полицна сушарка; Ц — циклон; В — вентилятор; Є — місткість; 1 — сушильний агент; 2 — відпрацьований сушильний агент; 3 — очищений газ; 4 — гранули ПАС; 5 — гранули ПАС після стадії фінального сушіння; 6 — дрібні частинки.³

них та масотеплообмінних характеристик пристроїв з вихровими та високотурбулізованими одно- та двофазними потоками», «Гідродинамічні показники двофазних потоків тепломасообмінного, грануляційного та сепараційного обладнання» на кафедрі «Процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв» Сумського державного університету створено експериментальний стенд для стадії фінального сушіння гранул ПАС (рис. 3).

Загальний вигляд триступеневої гравітаційної полицної сушарки представлено на рис. 4. В експериментальній сушарці використано оригінальне конструктивне рішення [15] з розташування кожної полиці з різним зазором по відношенню до стінки апарату. Короткий опис фізичного моделю процесу сушіння подано нижче на базі опису [15].

На верхній похилій контактній полиці при контакті дисперсного матеріалу з сушильним агентом (прогрівання), де величина зазору має максимальне значення, довжина полиці є мінімальною, що забезпечує мінімально необхідний час контакту фаз і повне прогрівання без перегрівання дисперсного матеріалу, що

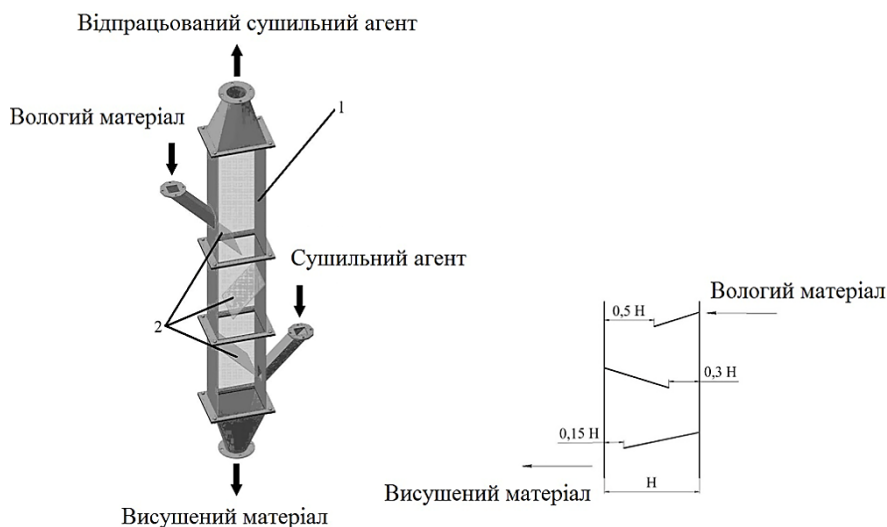


Рис. 4. Гравітаційна полична сушарка: 1 — корпус; 2 — перфоровані полиці.⁴

може негативно впливати на процес при сушінні термолабільних матеріалів.

В цей же час на ній відбувається видалення дрібної фракції, тобто верхня похила контактна полиця виконує роль сепаратора, що позитивно впливає на формування зваженого шару на наступних полицях контакту завдяки вирівнюванню значення пористості.

На середній похилій контактній полиці, де величина зазору є меншою, при контакті дисперсного матеріалу з сушильним агентом (видалення вологи з поверхневого шару) час перебування дисперсного матеріалу та контакту з сушильним агентом збільшиться внаслідок збільшення довжини контактної полиці, що сприяє інтенсивному видаленню незв'язаної вологи; при цьому час перебування дисперсного матеріалу на полиці відповідає необхідному значенню часу сушіння в цьому періоді (період постійної швидкості сушіння).

На нижній похилій контактній полиці при контакті дисперсного матеріалу з сушильним агентом (видалення вологи з глибини матеріалу), де величина зазору має мінімальне значення, довжина полиці є максимальною, що забезпечує ефективне видалення зв'язаної вологи з глибини матеріалу та максимально необхідний час контакту фаз в цьому періоді (період спадання швидкості сушіння).

Якщо проміжок у горизонтальній площині між стінкою корпусу та вільним кінцем похилих контактних полиць буде більшим

ніж 0,5 ширини корпусу, то буде відбуватися короточасний контакт дисперсного матеріалу та сушильного агента без прогрівання дисперсного матеріалу до необхідної температури і одночасне видалення дрібної фракції, що буде негативно впливати на якість висушеного дисперсного матеріалу.

Якщо проміжок у горизонтальній площині між стінкою корпусу та вільним кінцем похилих контактних полиць буде меншим ніж 0,15 ширини корпусу, то буде відбуватися перегрів матеріалу, його розтріскування та руйнування внаслідок довготривалого контакту з сушильним агентом, що буде негативно впливати на якість висушеного дисперсного матеріалу.

Розрахунок технологічних параметрів роботи гравітаційної поличної сушарки, зокрема, часу перебування гранул ПАС і температурно-вологісних показників потоків проводився відповідно до авторського математичного моделю [16] із застосуванням програмного продукту Multistage fluidizer[®] [17] (рис. 5).

При цьому програмний продукт уможливорює проводити розрахунок технологічних параметрів процесу одержання гранул ПАС з нанопористою структурою залежно від конструктивних особливостей перфорованого поличного контакту.

Приклад розрахунку часу перебування гранули ПАС в робочому просторі сушарки наведено на рис. 6, приклад розрахунку температурно-вологісних характеристик потоків — на рис. 7.

Прилади й обладнання:

- для визначення гідродинамічних характеристик руху потоків — термоанемометр TES-1340;
- для вимірювання температури повітря — ртутний термометер;
- для вимірювання витрати повітря — камерна діафрагма, вимірювальний перетворювач перепаду тиску;
- для вимірювання витрати води, що надходить до місткості для приготування розчину, — ротаметр;
- для вимірювання температури в калорифері — термопара ТС10-С, потенціометр реєструвальний самописний КСП-+/3;
- для вимірювання температури в робочому просторі гранулятора — тепловізор Fluke Ti25, пірометр Victor 305В-*;
- для вимірювання вологості гранул і повітря — мультиметр DT-838, дієлькометричний вологомір ИВДМ-2С;
- для визначення міцності гранул — екстензометр ИПГ-1, прилад для вимірювання міцності МИП-10-1;
- для вимірювання утримувальної здатності гранул — центрифуга кутова малогабаритна ЦУМ-1;
- для дослідження мікроструктури гранул — сканувальний електронний мікроскоп eTescan Vega 3 (для створення вуглецевої плівки на поверхні гранули — Carbon evaporation head CA7625 та SC7620 high resolution, manual Sputter Coater).

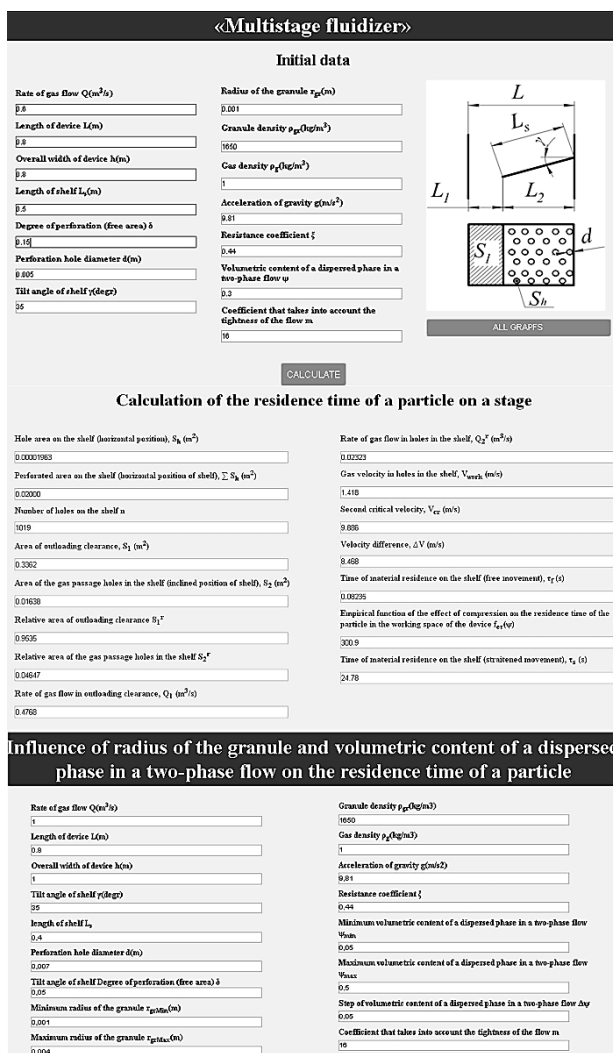


Рис. 5. Інтерфейс програмного продукту Multistage fluidizer®. 5

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати мікроскопії гранул за різних умов їх одержання наведено на рис. 8–10. Аналіза даних рис. 8 показує, що у разі недодержання розрахункового часу сушіння внутрішні шари гранули починають руйнуватися через надмірну кількість вологи (рис. 8, а), або в приповерхневих шарах гранули через підвищені термічні напруження починають з'являтися «механічні» пори (рис. 8, в). У разі чіткого додержання необхідного часу фінально-

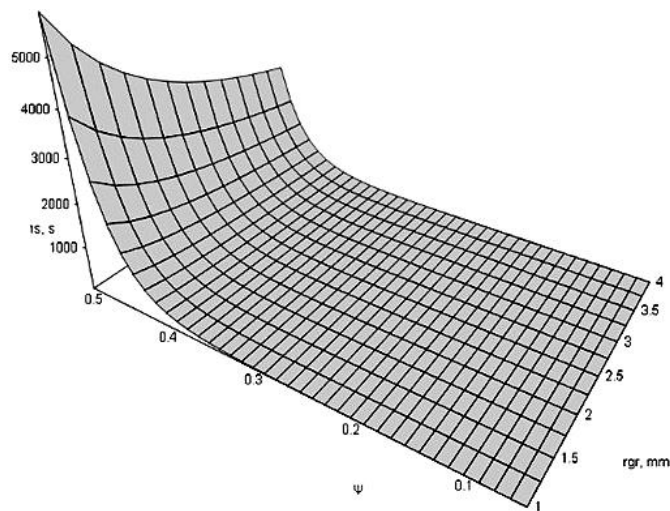


Рис. 6. Вплив радіуса гранули й об'ємного вмісту дисперсної фази в двофазному потоці на час перебування частинки.⁶

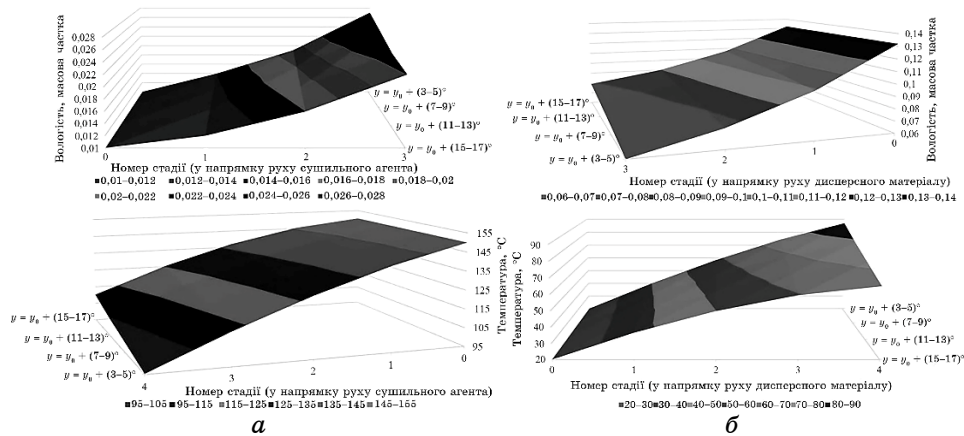


Рис. 7. Розрахунок температурно-вологісних характеристик потоків при зміні кута нахилу полиці: *a* — сушильний агент; *б* — гранули ПАС.⁷

го сушіння гранула має розвинену рівномірну нанопористу структуру приповерхневих і глибинних шарів.

Аналіза даних рис. 9 показує, що зі збільшенням ступеня стиснення потоку нанопориста структура приповерхневих шарів стає більш розвинутою (рис. 9, *a, б*). Це пояснюється зменшенням швидкості руху гранул ПАС в робочому просторі сушарки та збільшенням часу контакту їх з потоком сушильного агента. Од-

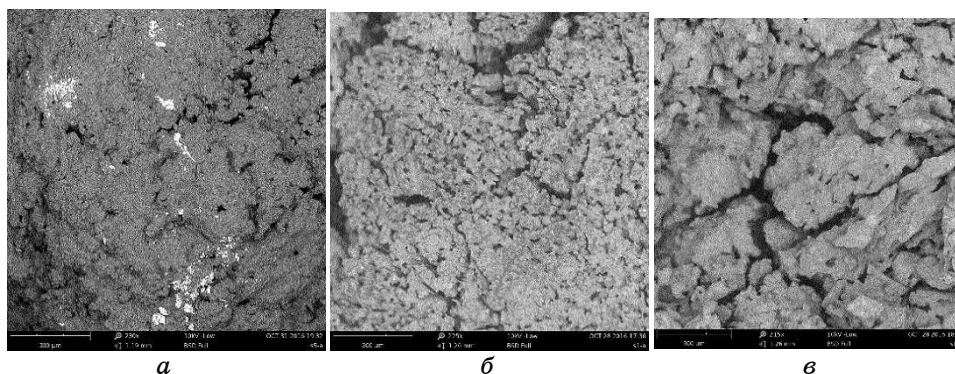


Рис. 8. Структура гранули ПАС залежно від часу термооброблення (триступеневе сушіння): *a* — «гідродинамічний» час сушіння менше «термодинамічного»; *б* — «гідродинамічний» час сушіння дорівнює «термодинамічному»; *в* — «гідродинамічний» час сушіння більше «термодинамічного».⁸

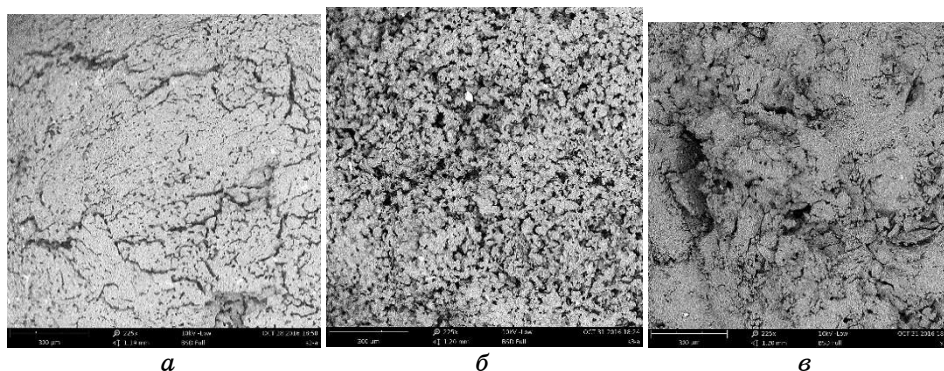


Рис. 9. Вплив ступеня стиснення потоку φ на характер нанопористої структури: *a* — $\varphi = 0,25$; *б* — $\varphi = 0,4$; *в* — $\varphi = 0,5$.⁹

нак після досягнення значення ступеня стиснення $\varphi = 0,4$ внаслідок перегріву гранули (збільшення «гідродинамічного» часу перебування гранули в сушарці в порівнянні з «термодинамічним») структура пор починає змінюватися: кількість прямолінійних макропор стає більшою, що є небажаним для приповерхневих шарів (рис. 9, *в*).

Окрім того, одержані макропори мають здебільшого «механічну» природу. Утворення «механічних» макропор (як і всіх інших пор, незалежно від розмірів і конфігурації) збільшує вбирну здатність гранули ПАС відносно дистилату дизельного палива. В той же час утримувальна здатність при збільшенні ступеня стиснен-

ня потоку починає зменшуватися внаслідок можливості вільного виходу дистилляту дизельного палива з прямолінійних макропор.

Таким чином, як оптимальний ступінь стиснення приймається показник $\phi = 0,4$. Також при подальшому дослідженні будуть використані дані, одержані для випадку, коли необхідний «гідродинамічний» час сушіння дорівнює «термодинамічному» (часу видалення вологи до нормативного показника), як це зазначено в [18].

Характер зміни структури приповерхневих і глибинних нанопористих шарів на кожному зі ступенів сушарки продемонстровано на рис. 10 (структуру гранули після третього ступеня фінального сушіння представлено на рис. 9, б). В таблиці наведено дані щодо властивостей гранул ПАС після стадії фінального су-

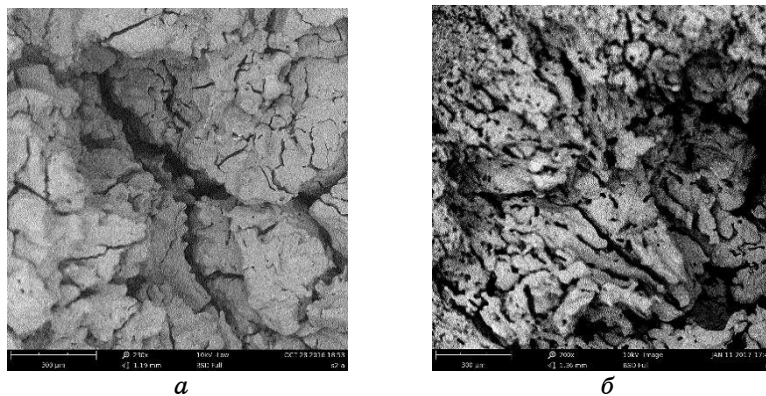


Рис. 10. Зміна внутрішньої структури нанопор на ступенях сушарки: а — перший ступінь; б — другий ступінь.¹⁰

ТАБЛИЦЯ. Властивості гранул ПАС після стадії фінального сушіння на кожному зі ступенів сушарки.¹¹

Номер ступеня сушарки	Міцність, кг/Гранула	Вбирна здатність, %	Утримувальна здатність, %	Відносна площа нанопористої поверхні, м ² /м ²	Відношення площі пор на поверхні шару в одиниці маси Гранульованого матеріалу, м ² /кг
1	0,4	8,9	10,3	0,49	2,25
2	0,4	9,0	10,6	0,52	2,29
3	0,4	9,1	10,9	0,54	2,32

шіння на кожному за ступенів сушарки (при $\varphi = 0,4$). Аналіза мікроскопії гранул і показників їхньої якості показала, що під час фінального сушіння міцність гранули не змінюється; цей факт є підставою для успішного транспортування гранул до місця проведення вибухових робіт без їх руйнування. На всіх трьох ступенях сушарки зафіксовано утворення мікро- та мезопор криволінійної конфігурації зі збільшенням їхньої кількості від ступеня до ступеня. Ці нанопори практично не змінюють значення вбирної здатності гранули ПАС, але впливають на збільшення утримувальної здатності та показників відносної площі пор. Таким чином, основне завдання, — збільшення утримувальної здатності гранул ПАС при збереженні їхньої міцності, — виконується повністю. Це дає підстави вважати стадію фінального сушіння ефективною для формування саме внутрішньої нанопористої структури.

4. ВИСНОВКИ

Наведені в роботі результати досліджень уможливають здійснити підбір оптимальної конструкції гравітаційної полицної сушарки, показника стиснення потоку (який визначає продуктивність сушарки) та характеристик сушильного агента.

Вибір конструкції перфорованої полиці та характеру її розташування в апараті визначає «гідродинамічний» час перебування гранули ПАС з урахуванням ступеня стиснення потоку.

Розрахунок кінетики зміни температурно-вологісних характеристик сушильного агента і гранул уможливорює одержати необхідний «термодинамічний» час перебування гранули ПАС у сушарці. Після проведення такого розрахунку та проектування сушарки під «термодинамічний» час перебування, як показали результати мікроскопії, в приповерхневих і глибинних шарах гранули ПАС створюється мережа мікро- та мезопор криволінійної конфігурації. При цьому виконується умова забезпечення міцного ядра гранули.

Аналіза структури гранули після кожного зі ступенів сушарки уможливорює коригувати технологічні параметри роботи апарата у разі зміни початкових даних для розрахунку (початкової вологості та температури гранули, ступеня стиснення потоку тощо) без зміни конструкції.

Представлену роботу виконано за підтримки МОН України в рамках проекту «Технологічні основи багатоступеневого конвективного сушіння в малогабаритних установках з блоками утилізації та рекуперації тепла» № 0120U100476 та за підтримки Cultural and Educational Grant Agency of the Slovak Republic (KEGA) в рамках проекту No. KEGA 002TnUAD-4/2019.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. T. J. Janssen, *Explosive Materials: Classification, Composition and Properties* (New York: Nova Science Publishers, Inc.: 2011).
2. B. Zygmont and D. Buczkowski, *Propellants Explos. Pyrotech.*, **32**, No. 5: 411 (2007); <https://doi.org/10.1002/prop.200700045>.
3. G. M. Erode, *Ammonium Nitrate Explosives for Civil Applications: Slurries, Emulsions and Ammonium Nitrate Fuel Oils* (Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co.: 2013).
4. N. Kubota, *Propellants and Explosives: Thermochemical Aspects of Combustion* (Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co.: 2015).
5. G. Martin and W. Barbour, *Industrial Nitrogen Compounds and Explosives, Chemical Manufacture and Analysis* (Seaside: Watchmaker Publishing: 2003).
6. P. Suppajariyawat, M. Elie, M. Baron, and J. Gonzalez-Rodrigues, *For. Sci. Int.*, **301**: 415 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.06.001>.
7. S. Jackson, *Proc. Combust. Inst.*, **36**, No. 2: 2791 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.09.027>.
8. A. E. Artyukhov and V. I. Sklabinskyi, *Nauk. Visnyk Nats. Hirnychoho Univ.*, **6**: 42 (2013).
9. T. Kudra and A. S. Mujumdar, *Advanced Drying Technologies* (New York: Marcel Dekker: 2002).
10. A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying* (Boca Raton: Taylor & Francis Group.: 2006).
11. A. E. Artyukhov, J. Krmela, and O. M. Gavrylenko, *J. Nano- Electron. Phys.*, **11**, No. 3: 03033 (2019); [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(3\).03033](https://doi.org/10.21272/jnep.11(3).03033).
12. A. E. Artyukhov and V. I. Sklabinskyi, *J. Nano- Electron. Phys.*, **8**, No. 4: 04051 (2017); [https://doi.org/10.21272/jnep.8\(4\(1\)\).04051](https://doi.org/10.21272/jnep.8(4(1)).04051).
13. N. O. Artyukhova and J. Krmela, *J. Nano- Electron. Phys.*, **11**, No. 4: 04006 (2019); [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(3\).04006](https://doi.org/10.21272/jnep.11(3).04006).
14. N. O. Artyukhova, O. B. Shandyba, and A. E. Artyukhov, *Nauk. Visnyk Nats. Hirnychoho Univ.*, **1**: 92 (2014).
15. A. E. Artyukhov, N. O. Artyukhova, and O. B. Shandyba, *Prystriy dlya Sushynnya Dyspersnykh Materialiv* [Device for the Disperse Materials Drying] (Patent 92423UA, Int. Cl F26B 3/02, F26B 17/12, filed 03.04.2014; issued 11.08.2011, Bulletin No. 15) (in Ukrainian).
16. V. Obodyak, N. Artyukhova, and A. Artyukhov, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019* (Eds. V. Ivanov et al.). *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (Cham: Springer: 2020), p. 813; https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_81.
17. A. E. Artyukhov, N. O. Artyukhova, V. K. Obodyak, and A. O. Gorishyak, *Komp'yuterna Programa 'Multistage Fluidizer'* [Computer Program 'Multistage Fluidizer'] (Authorship Certificate 79141UA, issued 17.05.2018).
18. A. E. Artyukhov, V. K. Obodyak, P. G. Boiko, and P. C. Rossi, *CEUR Workshop Proceedings*, **1844**: 33 (2017).

¹Sumy State University,
2, Rymkogo-Korsakova Str.,
UA-40007 Sumy, Ukraine

²Alexander Dubcek University of Trencin,
491/30, I. Krasku,

02001 Puchov, Slovak Republic

¹ Fig. 1. Periods of drying PAN granules: I—warming of pellet; II—period of constant drying rate; III—period of descending drying rate.

² Fig. 2. Technological scheme of fabrication of PAN (hydration and thermal treatment area). Area elements: ВГ—vortex granulator; ГИГ—gravitational shelf dryer; Т—heat exchanger; Г—gas blower; Н—pump; К—compressor; Тр—conveyor; Б—bunker. Flows: 1-1—return (pellets of ordinary ammonium nitrate); 2-2—heat-transfer agent (technological air); 3-3—humidifier; 4-4—air for dispersing the humidifier; 5-5—pellets for final drying; 6-6—packing pellets; 7-7—spent heat-transfer agent; 8-8—pair; 9-9—water condensate.

³ Fig. 3. Scheme of experimental stand: ГИГ—gravitational shelf dryer; Ц—cyclone; Б—air extractor; С—container; 1—drying agent; 2—spent drying agent; 3—purified gas; 4—PAN pellets; 5—PAN pellets after the final drying stage; 6—small particles.

⁴ Fig. 4. Gravitational shelf dryer: 1—vessel; 2—perforated shelves.

⁵ Fig. 5. Multistage fluidizer[®] software interface.

⁶ Fig. 6. Exposure to the radius of pellet and volume content of the dispersed phase in the two-phase flow during the particle residence time.

⁷ Fig. 7. Calculation of the temperature and humidity characteristics of flows when changing the angle of the shelf tilt: a —drying agent; σ —pellets PA.

⁸ Fig. 8. The structure of PAN pellets depending on the time of heat treatment (three-stage drying): a —‘hydrodynamic’ drying time less than ‘thermodynamic’ one; σ —‘hydrodynamic’ drying time equals ‘thermodynamic’ one; ϵ —‘hydrodynamic’ drying time more than ‘thermodynamic’ one.

⁹ Fig. 9. The impact of the compression ratio of the flow φ on the nature of the nanoporous structure: a — $\varphi = 0.25$; σ — $\varphi = 0.4$; ϵ — $\varphi = 0.5$.

¹⁰ Fig. 10. Change of the internal structure of the nanopores on the shelves of the dryer: a —first shelf; σ —second shelf.

¹¹ TABLE. PAN pellets’ properties after the final drying stage at each shelf of dryer.