

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

## **Багатошарові гранули аміячної селітри з наноструктурованими пористими шарами: технологія виробництва та показники якості**

А. Є. Артюхов<sup>1</sup>, Я. Крмела<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2,  
40007 Суми, Україна*

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

В статті дано обґрунтування можливості одержання пористої аміячної селітри (ПАС) з декількома наноструктурованими пористими шарами у вихрових грануляторах. Представлено основні результати досліджень структури нанопористих шарів гранул ПАС, яких одержано методом зволоження з наступним термообробленням у високотурбулізованому спрямованому (вихровому) потоці сушильного агента. Показано, що за рахунок підбору гідродинамічних і термодинамічних параметрів роботи вихрового гранулятора стає можливим одержати задану нанопористу поверхню з визначеним розміром пор. В рамках досліджень запропоновано використання декількох типів зволожувачів і показано особливості структури нанопористого шару залежно від складу зволожувача. В результаті потрібно забезпечити такі властивості гранул ПАС: збереження первинної кристалічної структури та фазового складу ядра гранули; міцне ядро без механічних пошкоджень; мінімальну кількість «механічних» пор по всьому об'єму гранули; внутрішні шари, в яких має бути певна кількість мікропор (розміром менше 2 нм) і мезопор (розміром від 2 до 50 нм); середні шари, які переважно мають складатися з мезопор і деякої кількості макропор (розміром більше 50 нм); поверхню, що складається переважно з макропор. Запропоновано послідовність використання зволожувачів для формування необхідної конфігурації нанопористого шару (на прикладі гранул рядової аміячної селітри з двома нанопористими шарами різної структури та додатковим зволоженням водою). Представлено результати визначення вбирної й утримувальної здатностей гранул ПАС, нанопористі шари якої сформовано різною комбінацією зволожувачів. Запропоновано основні технологічні параметри здійснення процесу формування нанопористих шарів

та алгоритм розрахунку цільового процесу. Наведено приклад конструктивного виконання вихрового гранулятора для одержання багатошарових гранул ПАС з нанопористими шарами.

The article gives reasons for the possibility to obtain porous ammonium nitrate (PAN) with several nanostructured porous layers in vortex granulators. The main results of studies regarding the structure of nanoporous layers of PAN granules obtained by the humidification method with subsequent heat treatment in a highly turbulent directed (vortex) flow of the drying agent are presented. As shown, it is possible to obtain a given nanoporous surface with a defined pore size due to the selection of the hydrodynamic and thermodynamic parameters of the vortex granulator. Several types of humidifiers are proposed in this research, and features of the nanoporous layer structure depending on the humidifier composition are shown. As a result, it is necessary to provide the following properties of PAN granules: preservation of the primary crystalline structure and phase composition of the core in the granule; the strong core without mechanical damages; the minimum number of 'mechanical' pores throughout the granules; inner layers, which should have a certain amount of micropores (with size of less than 2 nm) and mesopores (with size of 2 to 50 nm); middle layers, which should preferably consist of mesopores and a number of macropores (over 50 nm); a surface consisting predominantly of macropores. The technique to use humidifiers for formation of necessary configuration of nanoporous layer (on the example of the ordinary ammonium nitrate granules with two nanoporous layers of different structure and additional moistening with water) is proposed. The results regarding the determination of absorptivity and retentivity of PAN granules, nanoporous layers of which are formed by different combinations of humidifiers, are presented. The basic technological parameters to carry out the nanoporous-layers' formation process and the algorithm to calculate the target process are proposed. An example of the constructive implementation of a vortex granulator to obtain multilayer PAN granules with nanoporous layers is demonstrated.

В статье дано обоснование возможности получения пористой аммиачной селитры (ПАС) с несколькими наноструктурированными пористыми слоями в вихревых грануляторах. Представлены основные результаты исследований структуры нанопористых слоёв гранул ПАС, полученных методом увлажнения с последующей термообработкой в высокотурбулизованном направленном (вихревом) потоке сушильного агента. Показано, что за счёт подбора гидродинамических и термодинамических параметров работы вихревого гранулятора становится возможным получить заданную нанопористую поверхность с определённым размером пор. В рамках исследований предложено использование нескольких типов увлажнителей и показаны особенности структуры нанопористого слоя в зависимости от состава увлажнителя. В результате необходимо обеспечить такие свойства гранул ПАС: сохранение первичной кристаллической структуры и фазового состава ядра гранулы; прочное ядро без механических повреждений; минимальное количество «механических» пор по всему объёму гранулы; внутренние слои, в которых должно быть определённое количество микропор (размером ме-

нее 2 нм) и мезопор (размером от 2 до 50 нм); средние слои, которые в основном должны состоять из мезопор и некоторого количества макропор (размером более 50 нм); поверхность, состоящую преимущественно из макропор. Предложена последовательность использования увлажнителей для формирования необходимой конфигурации нанопористого слоя (на примере гранул рядовой аммиачной селитры с двумя нанопористыми слоями различной структуры и дополнительным увлажнением водой). Представлены результаты определения поглощающей и удерживающей способностей гранул ПАС, нанопористые слои которой сформированы разной комбинацией увлажнителей. Предложены основные технологические параметры осуществления процесса формирования нанопористых слоёв и алгоритм расчёта целевого процесса. Приведён пример конструктивного исполнения вихревого гранулятора для получения многослойных гранул ПАС с нанопористыми слоями.

**Ключові слова:** пориста аміачна селітра, нанопориста структура, вихровий гранулятор, технологія виробництва.

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

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

*(Отримано 4 грудня 2019 р.)*

## 1. ВСТУП

Наявність розвиненої поверхневої та внутрішньої нанопористих структур є обов'язковою умовою застосування окремих гранульованих матеріалів для спеціальних виробництв. Наявність пор різної конфігурації уможливорює збільшити питому поверхню масопередачі, забезпечити вбирання необхідної кількості рідкого матеріалу тощо. При цьому важливими характеристиками пористості є розміри та конфігурація системи пор і закономірності їхніх змін за радіусом гранули [1]. Окремо слід виділити таку характеристику пористої поверхні, як відношення площі пор на поверхні гранул (або площа пор окремих нанопористих шарів у разі створення багатошарових гранул) в одиниці маси гранульованого матеріалу. Ця характеристика уможливорює відобразити забезпечене проникнення рідкої (газоподібної) фази всередину гранули для здійснення цільового процесу.

Забезпечення необхідного розміру (діапазону розмірів) пор важливе з точки зору співвідношення його з розміром молекули речовини, яка має проникнути в ці пори. Розмір і конфігурація пор мають бути забезпечені за рахунок оптимального підбору технології формування пористої структури та конструкції основно-

го устаткування для реалізації цього процесу.

Гранульована аміячна селітра знайшла широке застосування в сільському господарстві як ефективне азотне добриво. Промисловість України випускає рядову аміячну селітру за відпрацьованими технологіями, які постійно удосконалюються ось уже понад п'ятдесят років. У той же час є інше застосування аміячної селітри в промисловості — як компоненти промислової вибухової речовини ANFO (ammonium nitrate/fuel oil). Така пориста аміячна селітра (ПАС) значно відрізняється за своїми властивостями від рядової аміячної селітри. ПАС має мати нанопористу структуру для забезпечення основних функцій — вбирання й утримання дистилату дизельного палива. Ці властивості ПАС необхідні для успішного використання її як компоненти промислової вибухової речовини ANFO [2–5].

Для проведення вибухових робіт, як показав досвід авторів роботи, може бути використана аміячна селітра будь-якої якості — непориста, з дефектами структури, некондиційна (дрібна або зруйнована). Рядова аміячна селітра також може бути компонентом ANFO, проте вона має ряд недоліків.

1. Рядова аміячна селітра покривається спеціальною оболонкою, яка перешкоджає передчасному розчиненню гранули після внесення її в ґрунт. Захисна оболонка перешкоджає доступу до внутрішніх пор гранули.

2. Рядова аміячна селітра може вапнуватися, що призводить до значного пониження (і, фактично, втрати) вибухових властивостей у суміші з дизельним паливом.

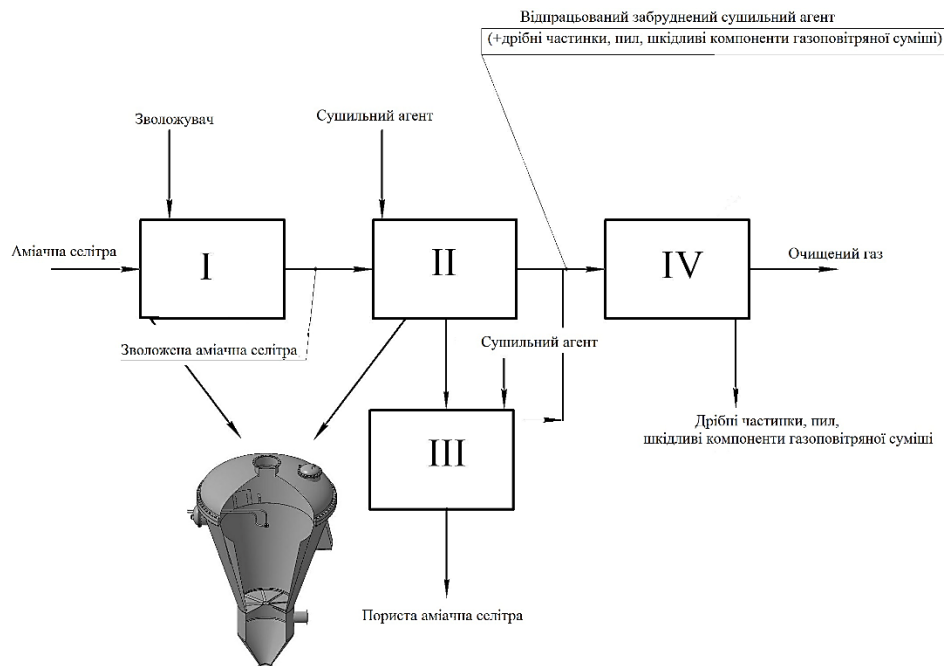
3. Рядова аміячна селітра не має достатньої пористості для успішного утримання всередині гранули дистилату дизельного палива.

4. Рядова аміячна селітра має певну кількість часу утримання. Проте природа пор є «механічною», а не «модифікаційною», оскільки їх одержано в результаті руйнування гранули (тріщини, відколи, каверни). Такі пори мають достатньо великий розмір ( $10^{-6}$ – $10^{-4}$  м), і утримати в них дистилат дизельного палива достатньо складно (при транспортуванні ANFO до місця проведення вибухових робіт дистилат дизельного палива витікає з гранули і в кращому випадку затримується на поверхні гранули, а в гіршому — залишає цю поверхню).

Виробництво ПАС з рядової аміячної селітри методом зволоження та термооброблення (спосіб є одним з найбільш енергетично ефективних і екологічно безпечних, що обґрунтовано в ряді робіт, наприклад [6, 7]) вимагає спеціальних гідродинамічних і термодинамічних умов, а також раціонального підбору типу та конструкції основного технологічного обладнання грануляційної установки. Основне завдання технології одержання ПАС з рядо-

вої аміачної селітри — формування мережі нанопор на поверхні гранули й у приповерхневих шарах зі збереженням міцності ядра [8]. Серію робіт авторів цієї статті [9–11] було присвячено теоретичному опису й експериментальному дослідженню процесу формування нанопористої поверхні гранул ПАС в апаратах з інтенсивною гідродинамікою — вихрових грануляторах із напрямленим псевдозрідженим шаром. Процес зволоження та термооброблення гранул рядової аміачної селітри (саме вона використовується як вихідна сировина для виробництва ПАС у схемі, яку представлено на рис. 1) з виділенням поверхневої вологи у високотурбулізованому вихровому потоці уможлиблює сформувати розвинену нанопористу структуру на поверхні гранули та в приповерхневих шарах її. Вихрові гранулятори мають такі переваги [12]:

- можливість істотного зменшення габаритних розмірів (зокрема висоти) робочого простору за рахунок змінної за висотою площі перерізу та можливості внутрішньої циркуляції ретурну;
- контроль часу перебування гранули в робочому просторі;



**Рис. 1.** Принципова схема виробництва ПАС: I — зволоження рядової аміачної селітри; II — термічне оброблення та сушіння рядової аміачної селітри після зволоження; III — фінальне сушіння гранул ПАС; IV — очищення відхідних газів.<sup>1</sup>

- можливість управління рухом гранули в робочому просторі;
- можливість створення в робочому просторі гранулятора інтенсивної турбулентности;
- універсальність (можливість проведення процесів грануляції та сушіння в об'ємі одного пристрою);
- технологічність і простота виготовлення;
- можливість швидкого переналадження та зміни конструктивних і технологічних параметрів у разі переходу на виробництво іншого типу гранульованого продукту.

В даний час ведеться пошук нових способів одержання гранул пористої аміячної селітри як компоненти промислових вибухових речовин. Одержані зразки ПАС мають мати високу пористість, достатню міцність, вбирну та утримувальну здатності.

Наявні способи одержання гранул ПАС засновано на застосуванні пороутворювальних і модифікаційних добавок, що підвищує собівартість готової продукції. Введення таких добавок також може привести до пониження показників міцности гранул ПАС.

Перед дослідниками поставлено завдання пошуку нових метод одержання ПАС, які мають забезпечити високі показники якости гранул і зменшити кількість технологічних стадій процесу формування нанопористої структури.

Окремий інтерес також представляє розробка технології виробництва багатошарових гранул ПАС, кожен з шарів якої має певну площу пор і переважний розмір пор. Гранула ПАС з різною структурою кожного з нанопористих шарів уможливорює забезпечити вільне проникнення дистилату дизельного палива через поверхню гранули та надійне утримання його в об'ємі гранули.

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА

Результати досліджень, яких було відображено в попередніх роботах авторів цієї статті [13, 14], показали, що різні типи зволожувачів можуть утворювати різні види пор у структурі пористої аміячної селітри після сушіння відповідно до такої класифікації:

- тріщини, відколи, каверни («механічні» пори);
- канали різної форми («модифікаційні» пори — мікро-, мезо- і макропори).

Деякі з цих пор утворилися в результаті термічних напруг і недостатньої міцности ядра вихідної гранули («механічні» пори), деякі — безпосередньо під час процесу сушіння гранули після зволоження («модифікаційні» пори). Різні типи зволожувачів також істотно впливають на співвідношення величин «механічних» і «модифікаційних» пор.

В результаті проведення досліджень потрібно забезпечити такі

властивості гранул ПАС:

- збереження первинної кристалічної структури та фазового складу ядра гранули;
- міцне ядро без механічних пошкоджень;
- мінімальну кількість «механічних» пор по всьому об'єму гранули;
- внутрішні шари, в яких має бути певна кількість мікропор (розміром менше 2 нм) і мезопор (розміром від 2 до 50 нм);
- середні шари, які переважно мають складатися з мезопор і деякої кількості макропор (розміром більше 50 нм);
- поверхню, що складається переважно з макропор.

Сутність способу одержання багатошарових гранул пористої аміячної селітри у вихровому грануляторі можна описати наступними стадіями.

1. Зволоження гранули водою з наступним термообробленням — формування внутрішньої нанопористої структури гранули (мала кількість мікро- і макропор, основна частина — мезопори).

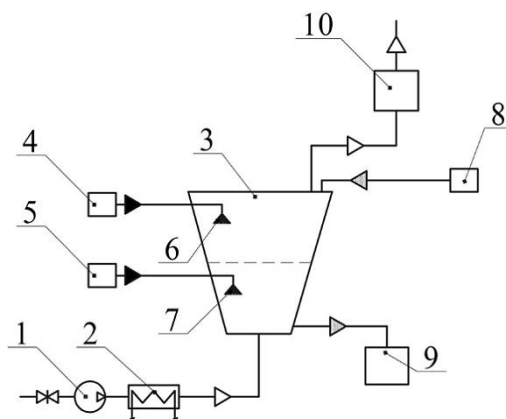
2. Модифікація гранул розчинами аміячної селітри, карбаміду, суміші аміячної селітри та карбаміду (залежно від необхідних властивостей пор) з наступним термообробленням — формування поверхневих шарів гранули з деякою кількістю мезопор і переважанням у нанопористій структурі макропор; ця стадія може повторюватися кілька разів.

Застосування запропонованого способу одержання гранул пористої структури у вихровому газовому потоці уможливорює [15]:

- створити розвинену пористу структуру на її поверхні вже в межах ядра псевдозрідженого шару на початковому етапі контакту з вихровим потоком високотемпературного теплоносія до виходу гранули на дзеркало псевдозрідженого шару;
- запобігти утворенню гранул з формою, відмінною від сферичної;
- повністю виключити чинник впливу на диспергування — нерівномірність надходження до диспергатора рідкого матеріалу.

В рамках науково-дослідних робіт «Дослідження гідродинамічних 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 одержання гранул ПАС (рис. 2).

**Термодинамічні умови одержання гранул ПАС.** В ході проведення експериментальних досліджень попередній прогрів гранул здійснювався до температури у 70°C. При зрошенні зволожувачем з температурою до 50°C відбувається різке (стрибкоподібне) понижен-



**Рис. 2.** Експериментальний стенд для одержання гранул ПАС: 1 — компресор; 2 — теплообмінник; 3 — вихровий гранулятор; 4, 5 — вузол приготування та подачі розчину до секцій вихрового гранулятора для зволоження ретуру (рядової аміячної селітри); 6, 7 — диспергатори; 8 — блок подачі ретуру; 9 — місткість готового продукту; 10 — вузол очищення відхідних газів.<sup>2</sup>

ня середньої температури вихрового псевдозрідженого шару, що приводить до виникнення надлишкових термічних напружень у гранулі та виникнення «механічних» пор — глибоких тріщин і сколів. При зрошенні зволожувачем з температурою вище  $80^{\circ}\text{C}$  відбувається інтенсивний випар вологи розчину з факелу розпилу зволожувача, що приводить до інтенсивного концентрування його та створення нових центрів кристалізації. Оптимальним є використання зволожувача з температурою, близькою до температури нагрітих гранул. Після зволоження процес нагрівання гранул продовжувався до температури у  $110\text{--}120^{\circ}\text{C}$  з видаленням парів вологи, яка надійшла з розчином.

**Гідродинамічні умови одержання гранул ПАС.** Діапазон стійкої роботи вихрового гранулятора визначається двома межами: початок псевдозрідження (перша критична швидкість руху сушильного агента) та винесення гранул з робочого простору гранулятора (перша критична швидкість руху сушильного агента). Критичні швидкості, як показано в роботах [16–19], залежать від розміру гранули, її маси (зміну якої зумовлено зволоженням), а також ступеня стиснення потоку гранул (відношення об'єму, який займають гранули, до загального об'єму гранулятора). Розрахунок автоматизовано на базі створеного авторського моделю розрахунку гідродинамічних параметрів роботи вихрового гранулятора [20, 21] за допомогою програмних продуктів Vortex granulator<sup>®</sup> [22] (рис. 3) і Classification in vortex flow<sup>®</sup> [23] (рис. 4).



Прилади та обладнання:  
 — для визначення гідродинамічних характеристик руху потоків

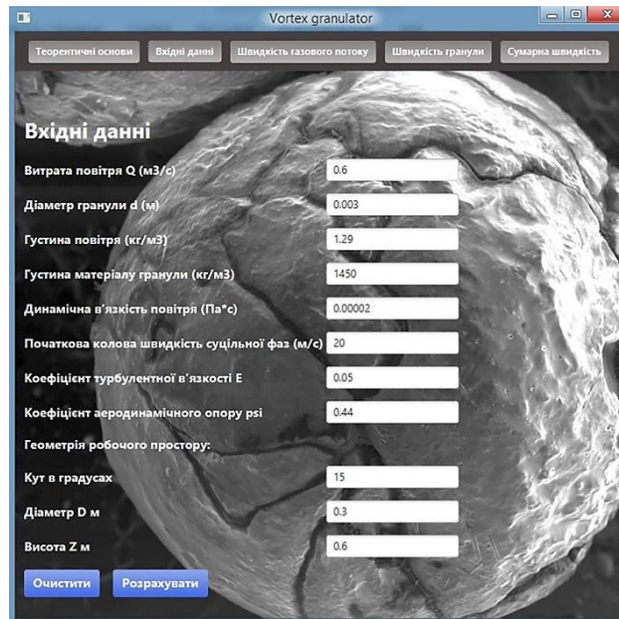


Рис. 3. Інтерфейс програмного продукту Vortex granulator<sup>®</sup>.<sup>3</sup>

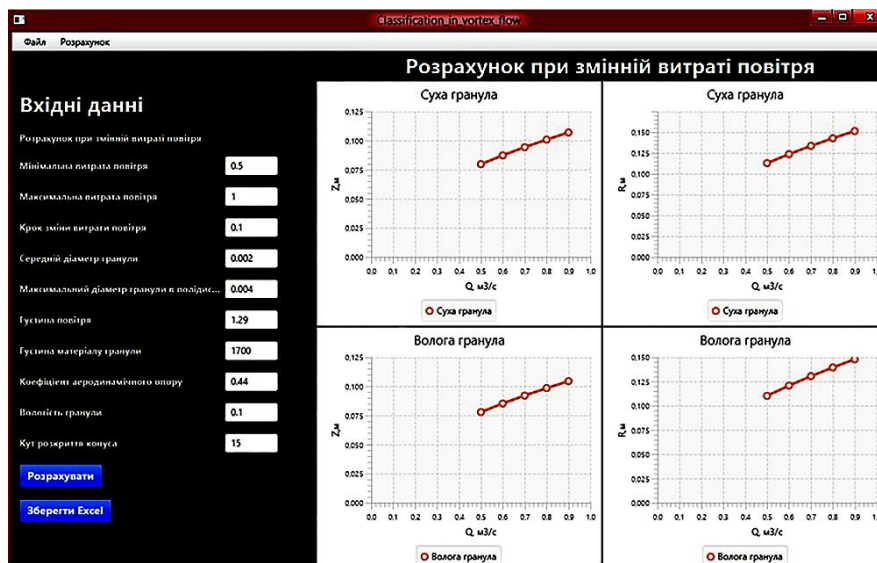
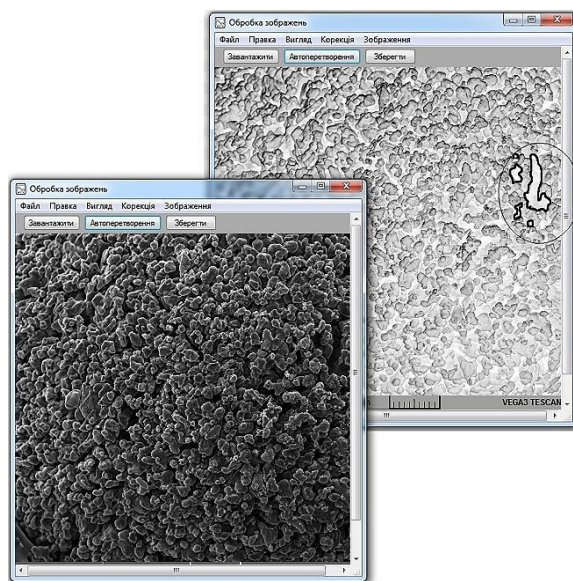


Рис. 4. Інтерфейс програмного продукту Classification in vortex flow<sup>®</sup>.<sup>4</sup>

- термоанемометр TES-1340;
- для вимірювання температури повітря — ртутний термометр;
- 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, діелькометричний 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).

Характер, розмір і кількість пор визначалися за допомогою авторського програмного продукту Converter Image (рис. 5).



**Рис. 5.** Інтерфейс програмного продукту Converter Image (на правій частині рисунку виділено сектор з прикладами конфігурації та розміру пор).<sup>5</sup>

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ ЇХ

Результати мікроскопії гранул ПАС на різних етапах формування багат шарового наноструктурного покриття представлено на рис. 6.

Результати мікроскопії уможливили встановити такі особливості формування структури нанопористого шару та гранули ПАС в цілому:

— зволоження розчином аміячної селітри уможлиблює одержати мережу криволінійних мікропор, в яких дистилат дизельного палива надійно утримується після надходження до об'єму гранули;

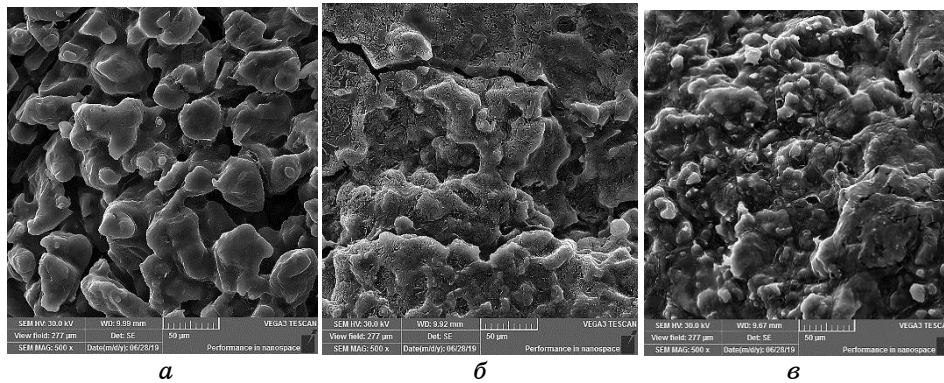
— наступний етап зволоження (розчин аміячної селітри та карбаміду) дає можливість сформувати здебільшого перехідні криволінійні пори;

— додаткове зволоження водою уможлиблює одержати на поверхні гранули прямолінійні макропори, через які дистилату дизельного палива відкривається доступ до внутрішніх шарів гранули;

— в цілому запропоновано комбінацію зволожувачів.

В таблиці наведено порівняльну характеристику гранул ПАС, які були зволожені різними типами рідких матеріалів; на рис. 7 показано властивості наноструктурованих шарів, яких було одержано шляхом термооброблення після зволоження різними типами рідких матеріалів.

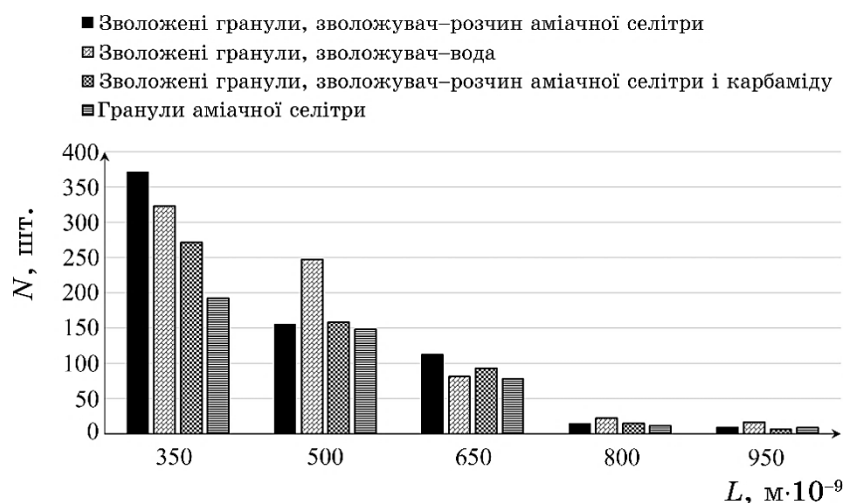
Як впливає з аналізу даних таблиці, зі збільшенням циклів



**Рис. 6.** Результати мікроскопії поверхневої структури нанопористого шару в гранулі ПАС: *a* — зволоження розчином аміячної селітри; *б* — зволоження розчином аміячної селітри + розчином аміячної селітри та карбаміду (два шари); *в* — зволоження розчином аміячної селітри + розчином аміячної селітри та карбаміду + водою (додатковий цикл зволоження).<sup>6</sup>

**ТАБЛИЦЯ.** Порівняльна характеристика гранул ПАС, які були зволожені різними типами рідких матеріалів.<sup>7</sup>

Тип зволожувача	Міцність, кг/гранула	Вбирна здатність, %	Утримувальна здатність, %	Відношення площі пор на поверхні шару в одиниці маси гранульованого матеріалу, м <sup>2</sup> /кг
Розчин аміачної селітри	0,44	8,3	9,4	2,24
Розчин аміачної селітри + розчин аміачної селітри та карбаміду (два шари)	0,42	8,5	9,8	2,03
Розчин аміачної селітри + розчин аміачної селітри та карбаміду + вода (два шари з додатковим зволоженням)	0,41	8,8	10,1	1,92

**Рис. 7.** Вплив типу зволожувача на характеристики нанопористого шару: кількість пор заданого розміру на одиницю площі (1000 мкм<sup>2</sup>).<sup>8</sup>

зволоження та термооброблення міцність гранули знижується. Це зниження не є критичним (нормативне значення — 0,4 кг/гранула) завдяки високому ступеню турбулізації потоку сушильного агента та, як наслідок, недовготривалому процесу термооброблення на кожній зі стадій.

Однак збільшення кількості шарів на гранулі ПАС (наслідком чого є збільшення циклів термооброблення) може зменшити міц-

ність гранули нижче за нормативне значення. Тому важливою є розробка нових способів термооброблення, які могли б мінімізувати цикли контакту гранул ПАС із потоком високотемпературного сушильного агента.

Показники вбирної й утримувальної здатностей збільшуються зі збільшенням циклів зволоження та термооброблення, що пояснюється збільшенням об'єму пор. Збільшення утримувальної здатності додатково можна пояснити раціональним підбором циклів зволоження (типу зволожувача), які забезпечують вільне проникнення дистилляту дизельного палива за рахунок прямих мезо- і макропор, та надійне утримання дистилляту за рахунок розгалуженої мережі криволінійних (звивистих) мікропор. Характер зміни кількості пор заданого розміру підтверджується даними рис. 7.

На базі одержаних результатів (підтвердження оптимальних гідродинамічних і термодинамічних умов одержання наноструктурованих пористих шарів) стає можливою розробка методики технологічного розрахунку стадій зволоження та термооброблення гранул ПАС.

Початковими даними для технологічного розрахунку процесу одержання нанопористого шару є:

- виробнича потужність гранулятора  $G_{\text{гран}}$ ;
- фракційний склад ретуру та/чи середній діаметер ретуру  $d_{\text{сер}}^{\text{рет}}$ ;
- фракційний склад гранул (апарати для одержання гранул пористої структури шляхом зволоження з наступним термообробленням);
- початковий і необхідний кінцевий вологовміст гранули  $U_{\text{гран}}^{\text{поч}}$ ,  $U_{\text{гран}}^{\text{кін}}$ ;
- початковий і необхідний кінцевий вологовміст повітря  $U_{\text{пов}}^{\text{поч}}$ ,  $U_{\text{пов}}^{\text{кін}}$ .

Діаметер гранул після нанесення на них плівки товщиною  $S_{\text{пл}}$ :

$$d_{\text{гр}} = d_{\text{сер}}^{\text{рет}} + 2S_{\text{пл}}. \quad (1)$$

Об'єм розчину, який наноситься на одну гранулу ретуру (рядової аміячної селітри):

$$V_{\text{роз}} = 0,523[d_{\text{гр}}^3 - (d_{\text{сер}}^{\text{рет}})^3]. \quad (2)$$

Маса розчину з густиною  $\rho_{\text{роз}}$ , який наноситься на одну гранулу ретуру:

$$m_{\text{роз}} = V_{\text{роз}}\rho_{\text{роз}}. \quad (3)$$

Об'єм гранули ретуру:

$$V_{\text{рет}} = 0,523(d_{\text{сер}}^{\text{рет}})^3. \quad (4)$$

Маса гранули ретуру при густині ретуру  $\rho_{\text{рет}}$ :

$$m_{\text{рет}} = V_{\text{рет}} \rho_{\text{рет}}. \quad (5)$$

Маса гранули після нанесення розчину (розтопу):

$$m_{\text{гр}} = m_{\text{рет}} + m_{\text{роз}}. \quad (6)$$

Кількість гранул, вироблена за 1 годину роботи гранулятора при виробничій потужності  $G_{\text{гран}}$ :

$$N = G_{\text{гран}} / m_{\text{гр}}. \quad (7)$$

Необхідна кількість ретуру:

$$G_{\text{рет}} = Nm_{\text{роз}}. \quad (8)$$

Кількість розчину:

$$G_{\text{роз}} = G_{\text{гран}} - G_{\text{рет}}. \quad (9)$$

Об'ємна витрата сушильного агента (повітря), яка необхідна для видалення заданої кількості вологи з гранул при вмісті води у розчині (розтопі)  $x_{\text{вод}}^{\text{роз}}$  та густині повітря  $\rho_{\text{пов}}$ :

$$V_{\text{пов}} = \frac{G_{\text{роз}} x_{\text{вод}}^{\text{роз}}}{(U_{\text{пов}}^{\text{кін}} - U_{\text{пов}}^{\text{поч}}) \rho_{\text{пов}}}. \quad (10)$$

Для одержання багат шарових гранул розрахунок ведеться за аналогічним алгоритмом з урахуванням кількості шарів та їхньої товщини.

Кількість вологи, яка необхідна для зволоження гранул від початкового ( $U_{\text{гр}}^{\text{поч}}$ ) до кінцевого ( $U_{\text{гр}}^{\text{кін}}$ ) вологовмісту:

$$G_{\text{вол}} = G_{\text{гран}} (U_{\text{гр}}^{\text{кін}} - U_{\text{гр}}^{\text{поч}}). \quad (11)$$

#### 4. ВИСНОВКИ

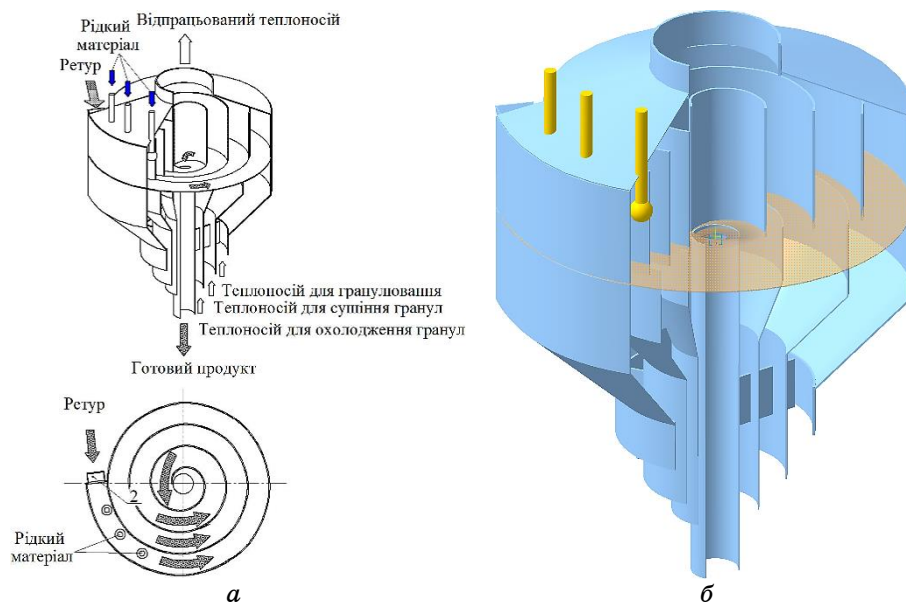
Аналіза результатів експериментальних досліджень продемонструвала, що різні типи зволожувачів після стадії термооброблення формують нанопористі шари різної конфігурації. В окремих випадках це — неглибокі прямолінійні пори, в інших — глибокі та звивисті. Тому процес формування нанопористої структури гранули ПАС можна здійснювати із застосуванням декількох зрошувачів в об'ємі одного апарату. Така реалізація процесу багаторазово-

го зволоження гранул рядової аміачної селітри з наступним термообробленням у межах багатоступеневих і/або багатофункціональних грануляційних апаратів дає задовільні результати.

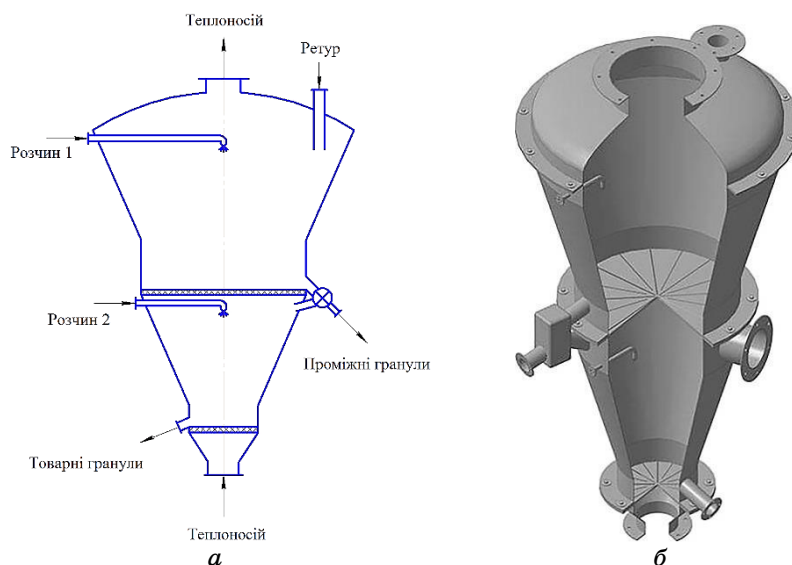
На рисунках 8, 9 показано конструкції грануляторів, в яких реалізовано новий спосіб одержання гранул ПАС [24, 25] — багатоступеневе зволоження, власне сушіння та додаткове охолодження гранул готового продукту.

Завданням подальших досліджень є створення та дослідження механізмів підвищення площі нанопор у гранулах ПАС, віднесеної до одиниці маси гранульованого матеріалу. Цього можна досягти, зокрема, створенням багатоступеневого фінального сушіння гранул ПАС в режимі спадної швидкості сушіння. Відпрацювання основних показників роботи сушильного обладнання на стадії фінального сушіння (цю стадію показано на рис. 1) є об'єктом окремого дослідження.

Представлену роботу виконано за підтримки МОН України в рамках проекту «Малогабаритні енергозберігаючі модулі із застосуванням багатофункціональних апаратів з інтенсивною гідродинамікою для виробництва, модифікації та капсулювання гранул» № 0119U100834 та за підтримки Cultural and Educational Grant Agency of the Slovak Republic (KEGA) в рамках проекту No. KEGA 002TnUAD-4/2019.



**Рис. 8.** Багатозонний гранулятор для одержання багатошарових гранул ПАС з нанопористою структурою: *a* — розрахункова схема; *б* — модель.<sup>9</sup>



**Рис. 9.** Багатосекційний гранулятор для одержання багатошарових гранул ПАС з нанопористою структурою: *а* — розрахункова схема; *б* — модель.<sup>10</sup>

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. G. M. Erode, *Ammonium Nitrate Explosives for Civil Applications: Slurries, Emulsions and Ammonium Nitrate Fuel Oils* (Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co.: 2013).
2. G. Martin and W. Barbour, *Industrial Nitrogen Compounds and Explosives, Chemical Manufacture and Analysis* (Seaside: Watchmaker Publishing: 2003).
3. T. J. Janssen, *Explosive Materials: Classification, Composition and Properties* (New York: Nova Science Publishers, Inc.: 2011).
4. B. Zygmont and D. Buczkowski, *Propellants Explos. Pyrotech.*, **32**, No. 5: 411 (2007); <https://doi.org/10.1002/prop.200700045>.
5. N. Kubota, *Propellants and Explosives: Thermochemical Aspects of Combustion* (Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co.: 2015).
6. A. E. Artyukhov and V. I. Sklabinskyi, *Nauk. Visnyk Nats. Hirnychoho Univ.*, **6**: 42 (2013).
7. A. E. Artyukhov and N. O. Artyukhova, *Springer Proc. Phys.*, **221**: 585 (2019); [https://doi.org/10.1007/978-3-030-17759-1\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-030-17759-1_41).
8. 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).
9. 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).
10. A. E. Artyukhov, *Proc. Int. Conf. NAP*, **5**, No. 2: 02NEA02 (2016).
11. A. E. Artyukhov and A. A. Voznyi, *Proc. Int. Conf. NAP*, **5**, No. 2: 02NEA01 (2016).



12. A. V. Ivaniia, A. Y. Artyukhov, and A. I. Olkhovyk, *Springer Proc. Phys.*, **221**: 257 (2019); [https://doi.org/10.1007/978-3-030-17759-1\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-17759-1_18).
13. A. Artyukhov and J. Gabrusenoks, *Springer Proc. Phys.*, **210**: 301 (2018); [https://doi.org/10.1007/978-3-319-91083-3\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91083-3_21).
14. A. E. Artyukhov and V. I. Sklabinskyi, *J. Nano- Electron. Phys.*, **9**, No. 1: 01015 (2017); [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(1\).01015](https://doi.org/10.21272/jnep.9(1).01015).
15. 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).
16. D. Gidaspow, *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions with Applications* (San Diego: Academic Press: 1994).
17. W.-C. Yang, *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems* (New York: Marcel Dekker: 2003).
18. K. Hiltunen, A. Jäsberg, and S. Kallio, *Multiphase Flow Dynamics. Theory and Numerics* (Helsinki: Edita Prima Oy.: 2009).
19. C. T. Crowe, *Multiphase Flow Handbook* (Boca Raton: Taylor & Francis Group: 2006).
20. A. E. Artyukhov and V. I. Sklabinskyi, *Chem. Chem. Technol.*, **9**, No. 2: 175 (2015); <https://doi.org/10.23939/chcht09.02.175>.
21. A. E. Artyukhov and V. I. Sklabinskyi, *Chem. Chem. Technol.*, **9**, No. 3: 337 (2015); <https://doi.org/10.23939/chcht09.03.337>.
22. A. E. Artyukhov, V. K. Obodyak, and P. G. Boyko, *Komp'yuterna Programa «Vortex Granulator»* [Computer Program 'Vortex Granulator'] (Authorship certificate 65140, issued 04.05.2016).
23. A. E. Artyukhov, V. K. Obodyak, and P. G. Boyko, *Komp'yuterna Programa «Classification in Vortex Flow»* [Computer Program 'Classification in Vortex Flow'] (Authorship certificate 67472UA, issued 26.08.2016).
24. A. E. Artyukhov, V. I. Sklabinskyi, K. V. Moskalenko, and O. V. Kremnyev, and O. V. Vykhrovyi, *Granulyator* [Vortex Granulator]; Patent 112394UA, Int. Cl B01J 2/16 (2006.01) (filed 06.07.2016; issued 12.12.2016, Bulletin No. 23) (in Ukrainian).
25. A. E. Artyukhov and A. V. Ivaniia, *Vykhrovyi Granulyator* [Vortex Granulator] (Patent 112921UA, Int. Cl B01J 2/16 (2006.01) (filed 23.06.2016; issued 25.11.2016, Bulletin No. 22) (in Ukrainian).

---

<sup>1</sup>Sumy State University,  
2, Rymsky-Korsakov Str.,  
UA-40007 Sumy, Ukraine

<sup>2</sup>Alexander Dubcek University of Trencin,  
491/30, I. Krasku,  
02001 Puchov, Slovak Republic

<sup>1</sup> Fig. 1. Principle scheme of production of PAS: I—hydration of ordinary ammonium nitrate; II—thermal treatment and drying of ordinary ammonium nitrate after hydration; III—final drying of PAN granules; IV—cleaning of waste gases.

<sup>2</sup> Fig. 2. Experimental stand for obtaining PAN granules: 1—compressor; 2—heat exchanger; 3—vortex granulator; 4, 5—assemblage of preparation and supplying of solution to sections of vortex granulator for moisturizing retour (ordinary ammonium nitrate); 6, 7—dispersators; 8—retour feed block; 9—container of the finished product; 10—waste gas purification assemblage.

<sup>3</sup> Fig. 3. 'Vortex granulator©' software interface.

<sup>4</sup> Fig. 4. 'Classification in vortex flow©' software interface.

<sup>5</sup> Fig. 5. 'Converter Image' software interface. (On the right side of the figure, there is a sector with examples of configuration and size of pores.

---

<sup>6</sup> **Fig. 6.** Results of microscopy of the surface structure of the nanoporous layer in the PAN granule: *a*—moistening with ammonium nitrate solution; *б*—moistening with solution of ammonium nitrate + with solution of ammonium nitrate and carbamide (two layers); *в*—moistening with solution of ammonium nitrate + with solution of ammonium nitrate and carbamide + with water (additional moistening cycle).

<sup>7</sup> **TABLE.** Comparative characteristics of PAN granules, which were moisturized with different types of liquid materials.

<sup>8</sup> **Fig. 7.** Effect of moisturizer type on characteristics of nanoporous layer: number of pores of a given size per unit of area ( $1000 \mu\text{m}^2$ ).

<sup>9</sup> **Fig. 8.** Multizone granulator for obtaining multilayer PAN granules with nanoporous structure: *a*—design diagram; *б*—design model.

<sup>10</sup> **Fig. 9.** Multisection granulator for obtaining multilayer PAN granules with nanoporous structure: *a*—design diagram; *б*—design model.