

УДК 66.099.2-936.43.001.57

ГІДРОДИНАМІКА ДВОФАЗНИХ ВИХРОВИХ ПОТОКІВ. ЇЇ ВПЛИВ НА ГАБАРИТИ ГРАНУЛЯЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

К.В. Жеба, В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов
Сумський державний університет

Створено математичну модель руху двофазного вихрового потоку в робочому просторі малогабаритного гранулятора. Викладено результати математичного моделювання гідродинаміки вихрових потоків. Проаналізовано вплив початкових, геометричних та технологічних параметрів на рух гранули, час її перебування в апараті та висоту робочого простору апарату. Запропоновано нові способи отримання гранул з особливими властивостями.

Создана математическая модель движения двухфазного вихревого потока в рабочем пространстве малогабаритного гранулятора. Изложены результаты математического моделирования гидродинамики вихревых потоков. Проанализировано влияние начальных, геометрических и технологических параметров на движение гранулы, время ее пребывания в аппарате и высоту рабочего пространства аппарата. Предложены новые способы получения гранул с особыми свойствами.

Враховуючи значний вплив технологічних параметрів роботи грануляційного обладнання та його конструктивного оформлення на рух гранул в апараті та його габарити, останнім часом ведуться пошуки нових високоефективних способів отримання гранульованої продукції. Практична реалізація перелічених заходів пов'язана з розробленням універсальної апаратури, що відповідає вищезазначеним вимогам [1].

Визначення закономірностей течії закручених потоків в вісесиметричних каналах, в тому числі стосовно роботи грануляторів зваженого шару, розробка рекомендацій і методик інженерного розрахунку та проектування апаратів з прогнозованими параметрами зважаючи на перспективу розвитку малотоннажних і малогабаритних виробництв гранульованих продуктів і впровадження нових способів і обладнання для грануляції є актуальною науковою та практичною задачею [2].

Метод розбризкування плава у вільний об'єм порожнистого апарату знайшов широке застосування як у вітчизняній практиці (АС-67, АС-72 та ін.) так і у закордонних технологіях гранулювання (схеми «Кеміко», «Стамікарбон», «Ай-Сі-Ай», «Штенгель», «Кеміко-Кальтенбах», «Тойо коатцу індастріел», «Норск-Гідро», «Нукло», «Нітротоп», «Ан-Де» та ін.) [3,4].

Недоліком грануляції розбризкуванням плаву у вільний об'єм інертного середовища є те що обладнання, яке використовується для здійснення цього методу, має великі габарити, складне у використанні. Ам'ячну селітру гранулюють у високих (30-60 м) або низьких (приблизно 21м) вежах. Для гранулювання карбаміду застосовують вежі висотою 50 м. Фосфати амонію та складні добрива, які отримують на основі нітрофосфатів та фосфатів амонію, гранулюють у вежах, висота яких сягає 50-66 м [5].

Одним з найбільш ефективних методів здійснення процесів тепломасообміну, як відомо, є псевдозрідження [6]. Переваги такої гідродинамічної системи відмічено в монографіях вітчизняних та зарубіжних науковців. Тому не випадково цей підхід отримав широкий розвиток в багатьох галузях промисловості.

Середній час перебування гранули нітрату амонію в типовій грануляційній вежі ($d=12-16$ м, $H=30-35$ м) становить $t=3-12$ с в залежності від її розміру. З метою зменшення висоти грануляційної вежі встановлюються охолоджувачі киплячого шару. Результати досліджень [5] довели можливість зниження висоти грануляційної вежі приблизно на 5 метрів за рахунок покращання умов розпику. Розрахунки за залежностями [7] в загальному випадку визначають період кристалізації гранули в межах $t=2-5$ с. В порівнянні з грануляторами зваженого шару розміри грануляційної вежі значно більші. Для апаратів зваженого шару час перебування гранули нітрату амонію визначається за критеріальною залежністю [8] та становить $t=180-360$ с. Доведено [9], що в вихрових апаратах збільшується час обробки продукту, який може досягати значення $t=600$ с з одночасним зменшенням об'єму робочого простору.

Стає можливим зменшення габаритних розмірів обладнання за рахунок правильного підбору форми робочого простору. Дослідження [10] довели доцільність використання апаратів конічної форми в технології баштового гранулювання, що обумовлено можливістю зміни величини швидкості газового потоку за висотою робочого простору та класифікації гранул за розмірами. Гранули, які мають розмір близький до номінального потрапляють до вивантажувального пристрою, а ті гранули, які не досягли потрібного розміру, знаходяться у вихровому шарі, який зрошується розчином.

Нестійкість роботи грануляторів зваженого шару при коливанні навантажень по рідкій та твердій фазі є їхнім значним недоліком. Для забезпечення стійкої роботи гранулятора зваженого шару в промислових умовах необхідно застосовувати складні системи регулювання роботи апарата. Іншим шляхом вирішення цієї проблеми є збільшення стій-

кості зваженого шару за рахунок зміни гідродинаміки робочого простору грануляційного пристрою. Перевагами запропонованого апарату є наявність вихрових потоків та перемінна швидкість газового потоку по висоті робочого простору та порівняно невеликі габарити, а також універсальність в роботі [11].

Поєднання переваг вихрового зваженого шару та раціональний підбір геометрії робочого простору дозволяє досягти зменшення габаритних розмірів грануляційного обладнання.

Вивчення гідродинамічних чинників течій фаз в робочому просторі грануляційного пристрою, що має удосконалену конструкцію має встановити основні закономірності руху двофазних вихрових потоків. Для досягнення цієї мети треба провести теоретичний аналіз гідродинамічних умов створення гранул та механізму протікання цього процесу в апаратах різних типів та розробити фізичну модель з подальшим математичним моделюванням гідродинаміки руху одно- та двофазного потоків для подальшого їх теоретичного розрахунку та прогнозування поведінки системи в разі зміни окремих параметрів. Аналіз математичної моделі дає можливість отримати відповіді щодо зменшення габаритних розмірів апаратів для грануляції та отримання такої гідромеханічної системи, яка б дозволила керувати польотом каплі при гранулюванні.

При створенні вдосконаленого грануляційного обладнання [12-14] досліджено гідродинамічні умови, необхідні для створення стабільного руху твердих часток у робочому об'ємі вихрового апарату зваженого шару, а також вплив технологічних і конструктивних параметрів грануляційних пристроїв на ефективність протікання процесів взаємодії двофазного потоку у зустрічному вісесиметричному потоці теплоносія.

Для вивчення характеру протікання технологічного процесу гранулювання у вихровому шарі необхідно, насамперед, визначити поля швидкостей газової фази, адже ці характеристики мають велике значення для проведення процесу та визначення оптимальної комбінації технологічних та конструктивних параметрів.

Рух газового потоку в грануляторі визначає в цілому всю гідродинаміку апарату. Тому визначення гідродинамічних параметрів потоку теплоносія є актуальною задачею. Потік теплоносія в такому грануляторі є тривимірним висхідним вихором.

Для розв'язання конкретної задачі руху фаз у вихровому грануляторі буде доцільним використовувати методіку, яка базується на рівняннях руху ідеальної або в'язкої рідини. З достатньою для інженерних розрахунків точністю такий рух можна описати рівнянням Нав'є-Стокса, ввівши в них коефіцієнт турбулентної в'язкості за гіпотезою Бусінеска [15]. Для вирішення рівняння Нав'є-Стокса у нашому випадку (вихровий рух потоку газу в робочому просторі зі змінною площею поперечного перерізу) обираємо циліндричну систему координат, що дає можливість проводити деякі спрощення стосовно процесу. При складанні математичної моделі були зроблені наступні допущення: потік є осісиметричним і сталим, течія газового потоку безвідривна, коефіцієнт турбулентної в'язкості обчислюється згідно алгебраїчної моделі турбулентності. Вирішення диференціальних рівнянь визначає аналітичні залежності складових швидкості руху газового потоку.

При розробці математичної моделі враховано: початкова закрутка потоку, геометричні розміри апарату, умови витання гранули в нижньому перерізі апарату, відсутність дроблення краплі у верхньому перерізі апарату, кут розкриття конусу та технологічні параметри. За результатом перебору цих параметрів визначено мінімальну висоту робочого простору апарата.

За результатами отриманої математичної моделі складено програму, яка дозволяє отримувати графічні та аналітичні залежності зміни складових повної швидкості газового потоку. Графічні залежності закладаються у відповідні вкладки програми.

Визначення швидкостей відбувається за рахунок розбиття робочого простору апарату сіткою на елементарні об'єми (рис. 1). При цьому програма прораховує значення складових повної швидкості починаючи від нижнього перерізу до верхнього. Отримавши значення на осі, відбувається зміщення координати на одиницю ближче до периферії, і так до тих пір, доки не досягається максимальне значення поточного радіуса на заданій висоті робочого простору. Далі відбувається переміщення по осі на одиницю вгору, і ведеться аналогічний розрахунок. При досягненні верхнього перерізу, що відповідає повній (максимальній) висоті робочого простору, всі розраховані значення виводяться у відповідне діалогове вікно. Результати розрахунку наведено на рис. 1 та 2.

Одержано систему диференціальних рівнянь, які описують залежність складових швидкості руху гранул в апараті від відповідних складових швидкості вихрового потоку теплоносія.

Результати розрахунку представлено як у вигляді графічних залежностей, так і в табличному вигляді, що дозволяє проводити аналіз роботи вихрового апарату, який полягає у визначенні силової дії на краплі рідини з боку газового потоку.

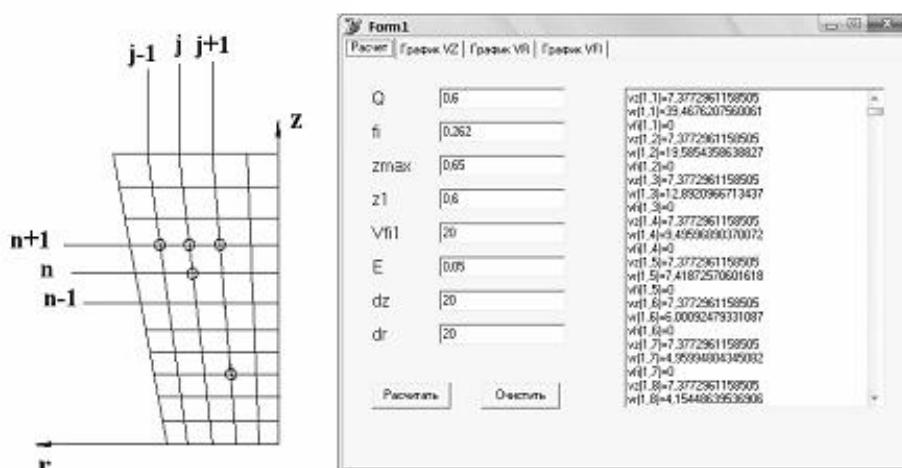


Рис. 1. Загальний вигляд розрахункової сітки та діалогового вікна програми для розрахунку складових повної швидкості газового потоку.

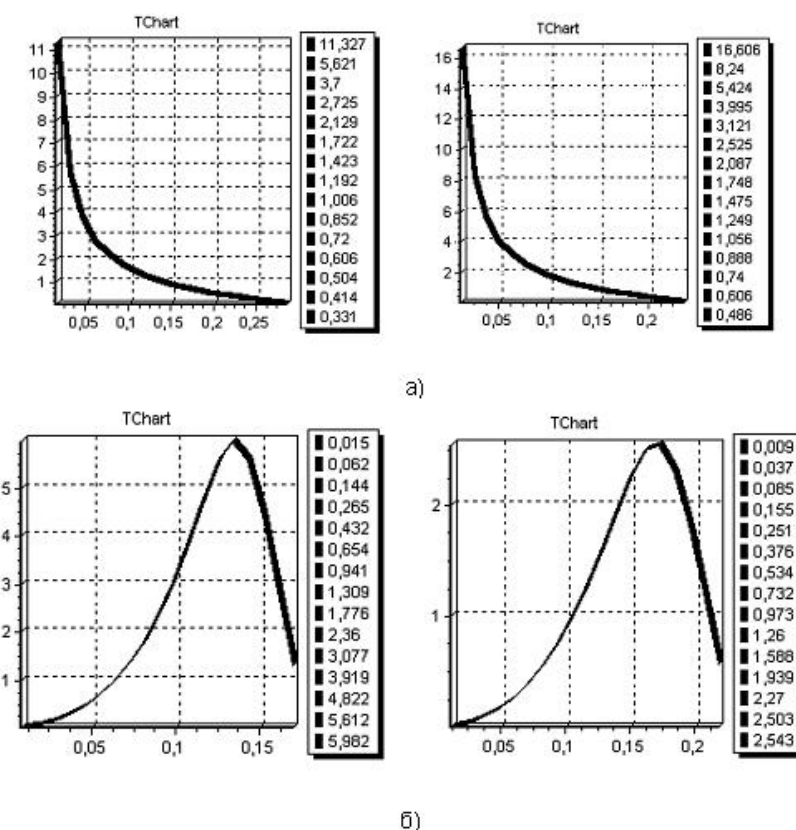


Рис. 2. Графічні залежності складових повної швидкості газового потоку, отримані за допомогою програми: а) радіальна складова; б) колова складова.

Для отримання значень складових повної швидкості гранули (краплі) використовується підхід Лагранжа [16]. На основі цього методу розглядається рух дисперсної фази під дією суцільної фази. Аналізуючи момент суцільної фази, момент краплі (гранули) та момент газової фази після взаємодії з дисперсною фазою, а також враховуючи сили, що діють на краплю (гранулу) під час польоту, вирішуємо систему диференціальних рівнянь руху краплі в циліндричних координатах. З урахуванням вищезазначених спрощень та припущень отримано значення колової, радіальної та вісьової складових повної швидкості дисперсної фази.

Траєкторія руху гранул, поля швидкостей газового потоку та гранули обумовлюють час перебування гранули у робочому просторі вихрового гранулятора. Цей час повинен бути достатнім, щоб крапля розчину (розплаву) повністю пройшла етап кристалізації. Аналіз траєкторії руху гранули за початкових умов та набору геометричних та технологічних характеристик (рис. 3) дозволяє визначити їх вплив на зміну траєкторії гранули та мінімально необхідний час її перебування в робочому просторі апарата.

Отримання графічної залежності руху гранули проводилося з використанням покадрової обробки відеозйомки процесу витання гранули в експериментальному стенді. Для цього вводилися «мічені» гранули і прораховувалося зміна їх положення за певний проміжок часу. Маючи швидкість (з математичної моделі) та час (проміжок між кадрами) було отримано відстань, яку долає частка.

Траєкторії руху гранули прораховано для різних технологічних (витрата по газу, початкова закрутка газового потоку, діаметр краплі (гранули)) та конструктивних (кут розкриття конусу конфігурація, робочого простору) параметрів.

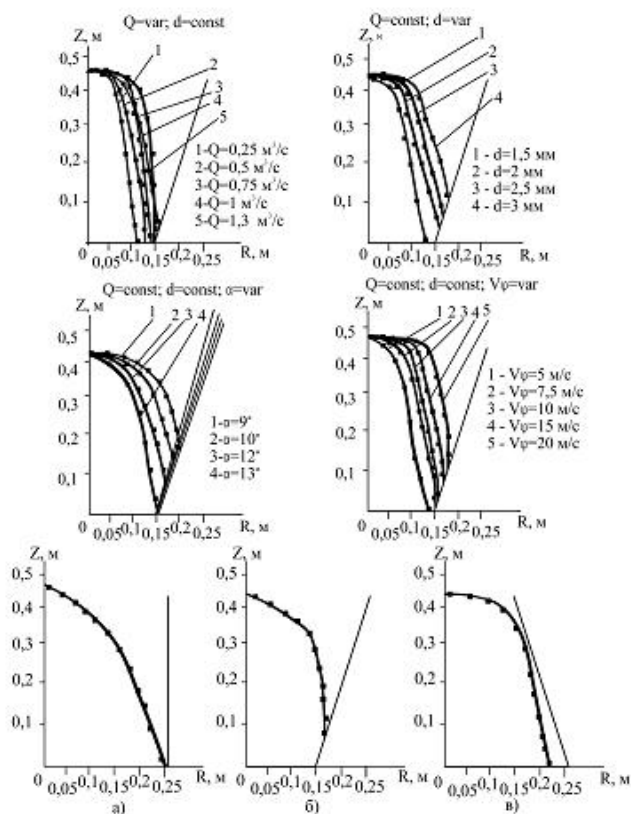


Рис. 3 Розрахункові траєкторії руху гранул за різних геометричних та технологічних умов та порівняльна розрахункова траєкторія руху гранули за різної конфігурації робочого простору апарата: а) циліндричний апарат; б) дифузор; в) конфузор.

Аналіз рис. 3 дозволяє виділити зони зменшення вертикального та горизонтального переміщення та зони, в яких це значення збільшується. Для циліндричного апарата (рис. 3а) спостерігаються постійність та рівномірність переміщення краплі вздовж вертикальної та горизонтальної осей унаслідок постійного значення витратної складової швидкості газового потоку по висоті робочого простору гранулятора. У міру наближення до нижнього перерізу робочого простору крапля кристалізується та втрачає частину вологи і маси. Тому газовий потік сприяє деякому уповільненню руху краплі вздовж вертикальної осі.

Для конічних апаратів залежно від конфігурації робочого простору картина руху гранули змінюється порівняно з робочим простором постійного перерізу. У дифузорі (рис. 3б) на початковому етапі внаслідок мінімального значення витратної складової швидкості газового потоку в верхньому перерізі та максимальної маси краплі переміщуються вздовж вертикальної осі швидше, ніж у нижньому перерізі, де рух краплі уповільнюється завдяки збільшенню витратної складової швидкості газового потоку та зменшення маси краплі внаслідок видалення з неї частини вологи.

У конфузорі (рис. 3в) спостерігається зворотна картина. При вильоті крапля рідкого матеріалу, що має максимальну масу, попадає в зону мінімальної площі перетину робочого простору апарата (зону максимальної витратної швидкості газового потоку). При цьому її рух уздовж вертикальної осі уповільнюється. У міру переміщення до нижнього перерізу крапля надходить до зон з меншою витратною швидкістю газового потоку і при цьому паралельно зменшується в масі. Тому впродовж всього часу перебування краплі в робочому просторі апарата його гідродинаміка сприяє уповільненню її руху.

На базі отриманих рівнянь математичної моделі та результатів експерименту [] розроблено комплексний алгоритм розрахунку гідродинаміки робочого простору вихрового гранулятора та визначення його конструктивних розмірів.

Дана методика включає в себе два етапи – гідродинамічний (аналіз вихідних даних (фізико – хімічні властивості фаз, навантаження по фазам, геометрія робочого простору апарата); визначення гідродинамічних показників газового потоку; перевірка умов витання гранул у нижньому перетині та відсутність процесу її дроблення у верхньому перерізі робочого простору апарату; аналіз сил, що діють на гранулу в газовому потоці; визначення гідродинамічних показників газового потоку після взаємодії з краплею; розрахунок траєкторії руху гранул) та технологічний (визначення необхідного часу перебування гранули в робочому просторі апарату; розрахунок конструктивних параметрів) розрахунки.

Час перебування гранули у робочому просторі апарату має значне значення на властивості кінцевого продукту. Визначено, що умови створені у вихровому грануляторі покращують поглинаючу здатність та міцність гранул, що має значення, які відповідають нормативним вимогам.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика часу перебування краплі в робочому просторі різних типів апаратів зваженого шару

Тип обладнання	Середній фактичний час перебування, с
Циліндричний гранулятор зваженого шару	180
Конічний гранулятор зваженого шару	220
Циліндричний гранулятор вихрового зваженого шару	230
Конічний вихровий гранулятор зваженого шару (дифузор)	350
Конічний вихровий гранулятор зваженого шару (конфузор)	450

Формування завершеної кристалічної структури гранули відбувається за рахунок збільшення часу контакту останньої з потоком теплоносія, що сприяє повному завершенню процесу кристалізації на поверхні гранули.

За результати запропонованої методики інженерного розрахунку було розроблено промисловий зразок вихрового гранулятора, який призначено для створення гранул мінеральних добрив, багатошарових гранул, а також гранул пористої структури.

Основні переваги розробленого малогабаритного вихрового апарата:

1. Можливість зменшення габаритних розмірів (зокрема, висоти) робочого простору пристрою.
2. Збільшення часу перебування гранули в робочому просторі вихрового апарата.
3. Можливість управління рухом гранули у робочому просторі пристрою.
4. Створення в об'ємі робочого простору інтенсивної гідродинаміки зі збільшеними числами Рейнольдса.
5. Після отримання поверхневого пористого шару ядро майже не змінюється за своєю структурою та зберігає міцність.

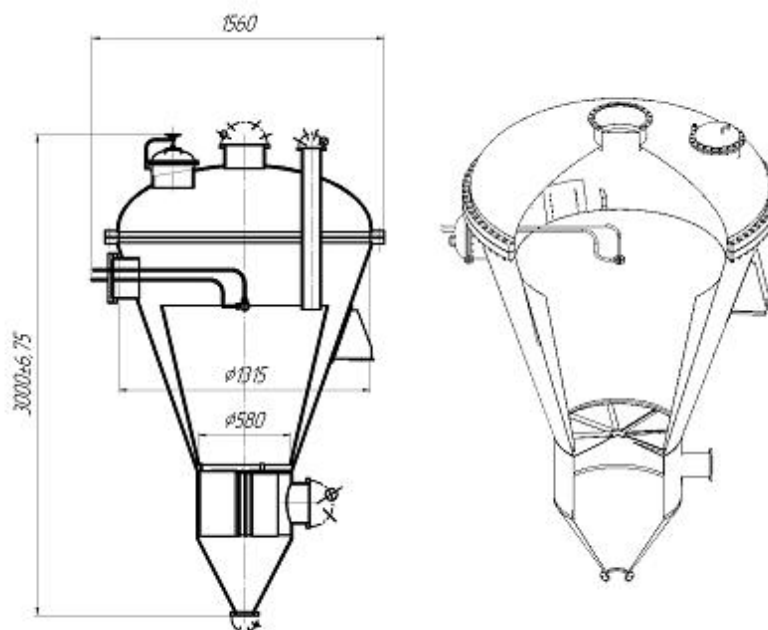


Рис. 4. Промисловий зразок гранулятора зваженого шару

Проаналізувавши відомі схеми для виробництва гранульованого продукту було розроблено технологічну схему з використанням вихрового гранулятора. Також створено трьохвимірну модель такого цеху (рис.5).

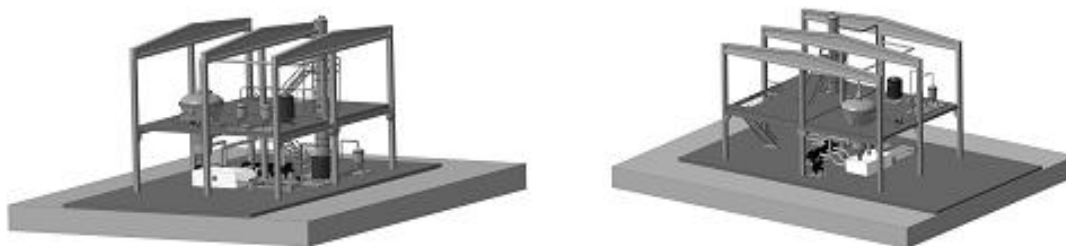


Рис. 5. Тривимірна модель цеху для створення гранульованого продукту.

В результаті проведених досліджень створено математичну модель руху двофазного потоку в апаратах вихрового типу; розроблено програму «Розрахунок гідродинаміки потоків в вихровому грануляторі», яка дозволяє отримувати числові та графічні залежності зміни складових швидкостей руху газової фази та крапель (гранул); після створення математичної моделі, отримання результатів створеної програми та проведення ряду експериментальних досліджень [17, 18] розроблено методику інженерного розрахунку вихрового гранулятора зі зниженою висотою польоту гранули для застосування в промислових умовах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Артюхов А.Е. Высокоэффективные вихревые аппараты в малотоннажных производствах гранулированных продуктов / А.Е. Артюхов, В.И. Склабинский // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии: сб. научных трудов XX Международной научно-технической конференции. – Минск, 2008. – С. 272–277.
2. Жеба К.В. Гідродинаміка двофазного потоку у робочому просторі вихрового гранулятора / К.В. Жеба, В.І. Склабинський, А.Є. Артюхов // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробі-

- тників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій. – Суми: Вид–во СумДУ, 2009. – Ч. I, Вип.11. – С. 87.
3. Производство аммиачной селитры в аппаратах большой единичной мощности / [Иванов М.Е., Поляков Н.Н., Поплавский В.Ю. и др.]; под ред. В.М. Олевского. – М.: Химия, 1990. – 288 с.
 4. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот). Ч 2. / [Позин М.Е., Арсеньева Л.З, Каганович Ю.Я. и др.]. — Л.: Химия, 1974. – 768 с.
 5. Казакова Е.А. Гранулирование и охлаждение азотсодержащих удобрений / Казакова Е.А. – М.: Химия, 1980. – 288 с.
 6. Давидсон И. Псевдооживление / Давидсон И., Харрисон Д.; пер. с англ. Айнштейна В. Г., Гельперина Э. Н., Новобратского В.Л. – М.: Химия, 1974. – 728 с.
 7. Расчёт оборудования для гранулирования минеральных удобрений / [Генералов М.Б., Классен П.В., Степанова А.Р., Шомин И.П.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 192 с.
 8. Классен П.В. Гранулирование / Классен П.В., Гришаев И.Г., Шомин И.И. – М.: Химия, 1991. – 240 с.
 9. Маренок В.М. Оцінка ефективності застосування конічних грануляційних веж при виробництві гранульованих продуктів з розчинів / В.М. Маренок, В.І. Склабінський // Вісник Сумського державного університету. - 2005. - № 12 (84). – С. 22–27.
 10. Сажин Б.С. Типовые сушилки со взвешенным слоем материала / Б.С. Сажин, Е.А. Чувпило – М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1975. – 71 с.
 11. Артюхов А.Є. Енергоощадні технології у хімічному виробництві. Малогабаритні вихрові гранулятори / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції: зб. наукових статей. – Львів, ЛьвЦНТЕІ, 2007. – С. 13–17.
 12. Патент №29950 Україна, МПК (2006) B01J2/16. Пристрій для гранулювання рідкого матеріалу / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський, А.С. Стеценко; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – №u200512066; заявл. 15.12.2005; надрук 11.02.2008, Бюл. № 3.
 13. Патент №82754 Україна, МПК (2006) B01J2/16. Спосіб гранулювання рідкого матеріалу та пристрій для його здійснення / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський; заявник та патентовласник Сумський державний університет – №a200608137; заявл. 20.07.2006; надрук 12.05.2008, Бюл. № 9.
 14. Патент України. Заявка №a200812720 від 30.10.2008р., МПК (2006) B 01 J 2/16. Спосіб отримання гранул пористої структури та пристрій для його здійснення / Артюхов А.Є., Склабінський В.І., Жеба К.В.
 15. Щукин В.К. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В.К. Щукин, А.А. Халатов. – М.: Машиностроение, 1982. – 200 с.
 16. Сошенко М. В. Исследование процессов тепло-массообмена в вихревых многофункциональных аппаратах с активной гидродинамикой: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Сошенко М. В. – М., 2005. – 141 с.
 17. Артюхов А.Є. Дослідження умов формування вихрового псевдозрідженого шару в малогабаритних масообмінних апаратах / А.Є. Артюхов, В.М. Маренок, В.І. Склабінський // Вісник Сумського державного університету. – 2007. – № 3. – С. 10–17.
 18. Склабінський В.І. Малогабаритні апарати змінного перетину з вихровим псевдозрідженим шаром. Вплив розподільних пристроїв на рух гранул / В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов // Хімічна промисловість України. – 2006. – № 2(73). – с. 55–59.

Жеба К.В. Гідродинаміка двофазних вихрових потоків. Її вплив на габарити грануляційного обладнання [Текст] / К.В. Жеба, В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов // Хімічна промисловість України. — 2009. — №4. — С. 47-52.