

УДК 536.24

А.А. ДОЛІНСЬКИЙ, А.О. АВРАМЕНКО, Г.К. ІВАНИЦЬКИЙ

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України
вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна**ВИКОРИСТАННЯ МЕХАНІЗМІВ
І МЕТОДІВ ДІВЕ ДЛЯ КЕРУВАННЯ КІНЕТИКОЮ
ПЕРЕБІГУ НАНОРІВНЕВИХ ПРОЦЕСІВ**

Наведено огляд теоретичних основ і прикладних методів тепломасообміну при дискретно-імпульсному введенні енергії у дисперсні середовища. Описано технології, засновані на принципі дискретно-імпульсного введення енергії: змішування, гомогенізації, екстракції, дегазації, емульгації, подрібнення, концентрування та грануляції. Наведено приклади високопродуктивних та енергоощадних промислових апаратів, дія яких ґрунтується на цьому принципі. Розглянуто перспективи розвитку і практичного використання принципів дискретно-імпульсного введення енергії у створенні сучасних нанотехнологій і наноматеріалів.

Ключові слова: тепломасообмін, дискретно-імпульсне введення енергії, гомогенізація, емульгація, грануляція.

ВСТУП

Стрімкий розвиток нанотехнологій дає змогу одержувати нові, раніше невідомі матеріали, біологічні об'єкти з унікальними теплофізичними й хімічними властивостями. Однак створити такі матеріали неможливо без глибокого вивчення на молекулярному рівні кінетики перебігу теплофізичних, хімічних та біологічних процесів, з'ясування механізмів, що керують ними, та фізичної природи супровідних явищ. Такий підхід полегшує завдання спрямованого динамічного та енергетичного впливу на колоїдні й супрамолекулярні об'єкти в гетерогенних рідинних середовищах. Вирішення цієї проблеми потребує проведення комплексу фундаментальних досліджень з вивчення сукупного впливу гідродинамічних, термічних та енергетичних факторів на ін-

тенсивність і характер перебігу в часовому й просторовому наномасштабному вимірі різноманітних нестационарних процесів.

Експериментальні дослідження з використанням механізмів і методів дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) передбачають ініціювання потужної імпульсної енергетичної дії на мікрооб'єкт, що забезпечує можливість впливу на його мікроструктуру і кінетику процесів, які відбуваються всередині об'єкта. Під час вивчення таких процесів застосовують методи електронної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу, лазерної фотон-електронної мікроскопії, ядерного магнітного резонансу.

Суть методу ДІВЕ полягає в тому, що енергія, яку вводять в апарат, розподілена дискретно по всьому робочому об'єму системи, і в кожному елементі об'єму виділяється ефективна питома потужність у вигляді коротких імпульсів, тобто дискретно в часі. Висока швидкість зміни тиску забезпечує виділення ефективної питомої потужності.

© А.А. Долінський, А.О. Авраменко,
Г.К. Іваницький, 2013

Аналіз результатів дослідження виконують у межах теоретичних і теплофізичних основ принципу ДІВЕ, які останнім часом було створено в Інституті технічної теплофізики (ІТТФ) НАН України. У грудні 1982 р. Постановою Президії АН УРСР № 499 як основний напрям досліджень Інституту в галузі тепломасообміну в дисперсних середовищах було затверджено розроблення теоретичних основ і прикладних методів тепломасообміну при дискретно-імпульсному введенні енергії у дисперсні середовища; створення нового класу тепломасообмінних апаратів, заснованих на принципі дискретно-імпульсного введення енергії.

Умовно розрізняють жорсткі й м'які механізми ДІВЕ [1]. Для стимулювання й інтенсифікації технологічних процесів, пов'язаних з руйнуванням твердих або рідких дисперсій, колоїдних частинок, міцелярних структур, клітин мікроорганізмів, а також з метою впливу на кінетику перебігу хімічних і біохімічних реакцій доцільно застосувати жорсткі механізми ДІВЕ. М'які механізми використовують для прискорення процесів міжфазного тепло- і масообміну, інтенсивного перемішування багатокомпонентних середовищ.

КАВІТАЦІЙНІ МЕХАНІЗМИ ДІВЕ

Найефективнішим механізмом спрямованого впливу на перебіг нанопроцесів у супрамолекулярних структурах і біологічних об'єктах є кавітація. Саме ініціювання кавітаційних механізмів уможливорює створення високоамплітудних енергетичних імпульсів з тривалістю кілька наносекунд і дає змогу концентрувати енергію таких імпульсів у дискретних локальних зонах нанометрових розмірів. Кавітаційні методи інтенсифікації технологічних процесів застосовують у різних виробництвах, пов'язаних з обробленням рідинних продуктів, у промислових технологіях оброблення харчових продуктів. Проте, незважаючи на значне поширення кавітаційних методів у сучасних технологіях, природу самої кавітації і супутніх ефектів ще далеко не з'ясовано. Трудно-

щі у вивченні закономірностей перебігу кавітаційних процесів можна пояснити тим, що способів візуалізації і реєстрації таких швидкоплинних процесів та їх взаємодії з макрооб'єктами сьогодні немає. Тому під час дослідження цих процесів найдієвішими засобами є сучасні математичні моделі й комп'ютерні технології.

На динаміку реальних процесів, що відбуваються в апаратах і установках і ґрунтуються на принципі ДІВЕ, впливає багато чинників, і для точного моделювання таких процесів необхідно враховувати характер впливу кожного фактора. При цьому інтенсивність впливу певного ефекту може посилюватися або послаблюватися іншими чинниками. У такому разі стають непридатними принципи мультиплікативності й суперпозиції врахування окремих факторів, а отже, системи, що реалізують принцип ДІВЕ, слід розглядати як багатофакторні системи, для моделювання яких необхідно використовувати сучасні аналітичні й чисельні методи.

Таким чином, для точного моделювання складних процесів і явищ із застосуванням ДІВЕ спрощені теоретичні підходи є мало-ефективними. Вимоги високої точності прогнозування зазначених процесів спричинюють необхідність використання сучасних теоретичних підходів, які дають змогу розглянути досліджувані явища з різних точок зору і виявити раніше невідомі закономірності. Тому відчутним проривом у цьому напрямі було розроблення і створення моделі динаміки одиначної парової бульбашки. Ця модель, на відміну від попередніх, є фізично достовірною і без додаткових обмежень однаково добре описує поведінку парової або парогазової бульбашки за будь-яких початкових умов.

Для теоретичного аналізу поведінки бульбашкового кластеру в конкретному кавітаційному пристрої та оцінювання рівня очікуваних динамічних і термічних ефектів розроблено математичну модель кавітаційного кластеру (ансамблю парових бульбашок), що ґрунтується на моделі динаміки одиначної парогазової бульбашки Долін-

ського — Іваницького [2, 3]. На основі моделі динаміки одиначної бульбашки з урахуванням в'язкості й стисливості рідини показано, що саме стисливість рідини відповідає на цій стадії за формування потужних акустичних імпульсів і акустичного шуму, що супроводжують явища розвиненої кавітації. В рамках моделі розраховано величини амплітуд цих імпульсів, які випромінює кластер у навколишнє середовище. Встановлено, що для води максимальні значення імпульсів тиску всередині бульбашок кластеру, а також у шарі рідини, який межує з поверхнею бульбашки, досягають величин близько 10 000 МПа, а тривалість такого імпульсу не перевищує 50 нс. На цій надзвичайно короткій стадії процесу кавітації температура речовини в невеликій локальній ділянці (розміром ~1–5 мкм) перевищує 5 000 К. Наведені максимальні значення температури й тиску набагато вищі, ніж критичні значення цих параметрів для води.

За таких умов речовину в цьому мікрооб'ємі впродовж згаданого проміжку часу можна розглядати як надкритичний флюїд. Відомо, що в рідині, яка перебуває в стані надкритичного флюїду, значення теплофізичних характеристик, таких як густина, ізобарна стисливість, ізобарна теплоємність тощо, змінюються на порядки порівняно з рідиною в докритичному стані. Ці фактори якісно впливають на характер процесів перенесення маси і теплоти в надкритичному флюїді, а також на кінетику перебігу хімічних реакцій. Показано, що в часовому наномасштабному вимірі відносно короткочасна тривалість перебування речовини в зоні кавітаційного захоплення бульбашки є достатньою для перебігу хімічних та біохімічних реакцій (процесів) на молекулярному рівні. Характерний час перебігу більшості таких реакцій вимірюється пікосекундами.

Одним із способів генерування бульбашок є адіабатне скипання потоку за допомогою спрямованого зменшення тиску вздовж проточного тракту. У міру падіння тиску в однофазовій системі виникають зародки парової фази, а далі — зона бульбашкового

кипіння з достатньо інтенсивним пароутворенням. Цей режим пов'язаний з падінням тиску нижче кривої насичення. В роботах [4, 5] наведено математичну модель адіабатного скипання рідини в каналі з урахуванням взаємодії між фазами та зі стінками каналу. Вона ґрунтується на фундаментальних законах збереження маси, імпульсу, енергії фаз, законах взаємодії на міжфазовій поверхні та зі стінками каналу. Глибокий аналіз механізмів інтенсифікації тепломасообмінних процесів у гетерогенних середовищах у пульсуючих потоках наведено в роботі [6]. Процес адіабатного скипання перегрітого потоку використовують для розроблення технологій емульгування та гомогенізації різних дисперсних середовищ.

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПУ ДІВЕ В БІОТЕХНОЛОГІЇ

В ІТТФ НАН України створено технологію термовакуумного оброблення (ТВО) біологічно активних рідинних продуктів з метою підвищення їхніх якісних показників [7]. Ефективність цієї технології зумовлена ініціюванням в апараті різноманітних механізмів ДІВЕ, зокрема механізмів вибухового скипання та кавітації. Кавітаційні ефекти реалізують у робочому колесі відцентрових насосів, які використовують як продуктові насоси для перекачування рідкого продукту і які за умовами технології номінально працюють у кавітаційному режимі. Так, у процесі оброблення молоко послідовно зазнає дворазової кавітаційної дії. Перша стадія кавітаційного оброблення відбувається в насосі, що працює в інтервалі температур 59–60°C. Після виходу з насоса молоко зазнає термічного оброблення в пастеризаторі за температури 80–95°C. Друга стадія кавітаційного оброблення відбувається перед виходом продукту з апарата у відцентровому насосі, який працює в інтервалі температур 25–30°C. Рівень кавітаційної дії в кожному з цих насосів, як зазначено вище, залежить від температурного режиму оброблення.

Отже, в технології термовакуумного оброблення відцентрові насоси, призначені

для перекачування великих об'ємів рідинного продукту, виконують також функцію кавітаційного реактора. У роботі [8] показано результати аналітичного дослідження кавітації у відцентрових насосах, що використовують у технології ТВО, і проведено розрахунки інтенсивності динамічних ефектів кавітації залежно від режимів оброблення.

Результати теоретичного дослідження миттєвих значень величини і напрямку векторів локальної швидкості мікротечій рідини в міжбульбашковому просторі тривимірного кластеру свідчать про наявність у ньому надзвичайно сильних зсувних напружень, порядку 103–105 Па. Разом з тим, значення температур і тисків пари всередині кавітаційних бульбашок на стадії їх максимального стиснення заходять далеко в закритичну область, а час існування таких зон з аномально високими термодинамічними параметрами не перевищує 20 нс. У межах цієї зони вода перебуває у фазовому стані надкритичного флюїду. За таких умов у водних білкових розчинах відбувається гідратація протеїнових молекул, що є визначальним фактором термостійкості молока. Молекули білка схильні до асоціації внаслідок взаємодії між радикалами за участю водневих і гідрофобних зв'язків. У закритичній області можливе руйнування енергетичних зв'язків під дією теплової енергії, яка дорівнює 21 кДж/моль, що перевищує енергію водневого зв'язку й гідрофобної взаємодії і призводить до руйнування білкових агрегацій.

Такий вплив кавітаційних механізмів ДІВЕ на білкові структури підтверджують результати дослідження фракційного складу білків молока. У разі застосування запропонованої технології термогідродинамічного оброблення молока характер зміни фракційного складу білків істотно відрізняється від того, що спостерігається у традиційних технологіях термооброблення. Термогідродинамічне оброблення спричинює зменшення кількості високомолекулярних білкових комплексів (міцел) і водночас — збільшення кількості фракцій з низькими молекулярними масами, що сприяє підвищенню агрега-

ційної стійкості комплексів і термостійкості молока в процесі оброблення.

Наочним прикладом ефективної енергетичної та динамічної дії кавітаційних механізмів ДІВЕ є пригнічення мікрофлори молока під впливом кавітації. Експериментальні дослідження свідчать, що рівень бактеріального обсіменіння вже після першого кавітаційного оброблення в насосах знижується на два порядки. При цьому кількість деяких видів бактерій на цих стадіях зменшується до нульового рівня. Додаткове зниження кількості мікроорганізмів ще на два порядки відбувається під час наступного термооброблення в пастеризаторі. Доведено, що ефективність знищення більшості зі стійких форм мікроорганізмів у результаті кавітаційного оброблення в насосах значно вища, ніж після термооброблення.

Висока ефективність знищення шкідливої мікрофлори під дією лише динамічних механізмів кавітації створює можливість для проведення термогідродинамічного оброблення молока за вказаною технологією за істотно менших температур пастеризації та гарантованого збереження потрібного ступеня стерилізації. Це дозволить значно (до 35%) скоротити енергетичні витрати на термічне оброблення продукту на підприємствах молочної промисловості.

Розвиток нанотехнологій, які дають змогу проводити й контролювати процеси на молекулярному чи навіть атомарному рівні, відкривають широкі й привабливі перспективи створення матеріалів з унікальними фізичними, хімічними та біофізичними властивостями. Останнім часом такі матеріали ефективно і з користю застосовують в енергетиці, інформаційних технологіях, матеріалознавстві, біології, медицині та інших прикладних сферах.

З цього погляду неабиякий науковий і практичний інтерес становлять везикулярні наноструктури, утворені молекулами фосфоліпідів. У полярних і неполярних розчинах фосфоліпідні здатні до самоорганізації з утворенням замкнених везикулярних структур розмірами в дискретних інтервалах від

25 до 100 нм та від 200 до 500 нм. У процесі утворення везикул певна частина дисперсійного рідинного середовища потрапляє всередину везикули — у внутрішню порожнину, обмежену двошаровою мембраною, а отже, у везикулу можна вводити різні біологічно активні речовини, вітаміни, ферменти тощо.

Такий спосіб капсулювання зазначених біологічно активних речовин чи ліків забезпечує адресну доставку необхідної мінімальної кількості лікарського препарату безпосередньо до живої клітини і водночас захищає його від негативного впливу навколишнього середовища (кислотності, лужності, підвищених температур тощо). Напівпроникна двошарова мембрана (завтовшки 4 нм) оберігає замкнений у ліпосомі препарат від дії несприятливих зовнішніх факторів і, разом з тим, запобігає перевищенню потрібної дози препарату під час його дії на живий організм. Ліпосома, по суті, є наноконтейнером, з якого препарат поволі вилучається в потрібних дозах протягом заданого терміну.

Технологічні засоби одержання ліпосом із заданими властивостями потребують спрямованого динамічного чи акустичного впливу з використанням різного роду механічних диспергувальних пристроїв або ультразвукових генераторів. В ІТТФ НАН України вперше запропоновано метод дискретно-імпульсної концентрації енергії для створення промислових технологій отримання везикулярних фосфоліпідних наноструктур із заданими властивостями.

Як відомо, з технологічного погляду процеси ферментації визначаються передусім ефективним подаванням, наступним барботуванням та інтенсивним перемішуванням живильного повітря з культуральним середовищем мікроорганізмів. Процес ферментації полягає у вирощуванні мікроорганізмів в умовах рівномірного локального розподілу кисню, що дискретно надходить до технологічного об'єму середовища. Тому для реалізації ферментативних процесів ефективним є впровадження методу ДІВЕ. Для вибору оптимальних режимних параметрів ферментації важливими є дослідження різних те-

плофізичних явищ, що супроводжують цей процес, зокрема, конвективних ефектів переносу речовини та енергії в базовій рідині (як правило, воді), живильного кисню, а також ефектів руху і масопереносу мікроорганізмів. Оптимізацію режимів здійснюють на основі теоретичних розрахунків біоконвективних процесів (біоконвекція — рух речовини середовища під дією перерозподілу щільності, зумовленого рухом мікроорганізмів). Критерій виникнення біоконвективних потоків визначають на основі методу лінійних збурень. У разі дії теплових ефектів завдання ускладнюється, і критерії нестійкості вже виявляються також функцією температурного режиму. Нелінійна модель біоконвективної нестійкості (модель Лоренца) дає змогу визначити не лише критерій виникнення біоконвекції, а й початок осцилюючої нестійкості та перехід до турбулентного режиму. Турбулентний рух у біоконвекції відбувається в дуже тонкому шарі і тому є майже двовимірним. Для побудови моделі турбулентного масопереносу при біоконвекції було використано ренормалізаційно-груповий аналіз, якій дозволяє абстрагуватися від феноменологічного (емпіричного) підходу. Приклади розрахунків біоконвективних течій наведено в [9].

Для сучасних біотехнологій важливим аспектом є розуміння процесів, що відбуваються під час поділу клітини. Заключний етап поділу клітини, коли перемичка, що з'єднує дві дочірні клітини, тоншає і розривається, називають цитокінезом. Експериментальні дані вказують, що порушення цитокінезу призводить до появи множинних міжклітинних містків та багатоядерних клітин і ставить під загрозу їх геномну й клітинну цілісність. Поява таких «дефектних» клітин може спричинити, наприклад, онкологічні захворювання.

Для розрахунків процесів цитокінезу було використано квазігомогенну математичну модель неньютонівської рідини, основу на рівнянні Нав'є — Стокса з урахуванням сил поверхневого натягу між взаємонепроникними фазами. Модель замикається:

- залежністю між тензорами напруг і швидкості деформацій (Oldroyd-B модель) [10];

- виразом для щільності середовища в обчислювальній комірці залежно від значень об'ємних фракцій кожної фази.

Поверхню поділу між цитоплазмою та зовнішнім середовищем визначають відповідно до розв'язання рівнянь нерозривності для об'ємних фракцій цитоплазми й зовнішнього середовища.

РОТОРНО-ІМПУЛЬСНА ТЕХНОЛОГІЯ

Розвиток різних мікрорідинних пристроїв за кілька останніх десятиріч зумовив зростання інтересу до мікромасштабних потоків. Виробничі процеси було спрямовано на розроблення пристроїв з характерними розмірами потоків порядку 10^{-6} м. Для перемішування, емульгування і гомогенізації різних гетерогенних систем широко використовують роторно-пульсаційні апарати циліндричного типу, розроблені в ІГТФ НАН України. Апарати працюють за принципом ДІВЕ — у потоку рідини створюються високі градієнти швидкості та пульсації тиску, що призводять до руйнування міжфазових поверхонь дисперсних включень. Таких ефектів досягають завдяки конструктивним особливостям апаратів роторного типу, робочими органами яких є коаксіальні перфоровані циліндри із зазорами між ними.

Дослідження мікромасштабного масопереносу утруднені через те, що закони, які традиційно використовують у теплопередачі й гідродинаміці макрообладнання, не описують істинну поведінку мікропотуку. Характер мікропереносу в них залежить не стільки від ефектів розрядженості, що є результатом зменшення щільності, а скоріше від зменшення розмірних масштабів, пов'язаних з областю течії.

Роторно-пульсаційні апарати характеризуються досить малими величинами ширини каналів, що дає змогу розглядати їх як мікроканали з ефектами проковзування потоку на стінках. У цьому випадку межі виникнення відцентрової нестійкості залежать не лише

від ширини каналу, а й визначаються також ступенем проковзування. У статті [11] на основі методу лінійних збурень проведено теоретичні дослідження критеріїв відцентрової нестійкості в мікроканалах між циліндрами, що обертаються, і в нерухомому криволінійному каналі. Показано, що залежності критичних чисел Тейлора і Діна від ширини мікроканалу мають мінімум, і принципово відрізняються від випадку течії без проковзування.

Пошук нових апаратно-конструктивних і режимно-технологічних рішень спрямовано на підвищення ефективності роботи апаратів та інтенсифікацію процесів у середовищах, що потребує теоретичних досліджень з вивчення гідродинамічної обстановки, моделювання процесів у нових апаратах. Ведуться роботи з розроблення тривимірної СРБ-моделі течії рідини і теплопереносу в ній, що дасть змогу на основі отриманих гідродинамічних і теплових збурень параметрів потоку здійснити узагальнення можливих механізмів диспергування в апараті та оцінювання їх впливу на кінцевий розмір дисперсних включень.

Ряд теплотехнологічних процесів (структурування, подрібнення, диспергування, емульгування, гомогенізація, перемішування тощо) проводять у роторно-пульсаційних апаратах дисково-циліндричного типу, що реалізують принцип ДІВЕ. Внутрішні зазори в такому обладнанні прямо залежать від розмірів одержуваних у них частинок. Отже, для наномасштабних процесів зазори повинні мати такі ж самі розміри.

У високодисперсних системах, на відміну від грубодисперсних, поряд з переліченими вище факторами істотну роль відіграють контактні взаємодії між дисперсними частинками, зумовлені дисперсійними силами, а також сукупністю поверхневих явищ на міжфазових межах. Тому при чисельному моделюванні високодисперсні мікро- і наномасштабні системи не можна розглядати як суцільні середовища. Для дослідження їхнього теплообміну і гідродинаміки використано підходи, засновані на гратчастому рівнянні Больцмана.

Метод ґрат Больцмана ґрунтується на дискретних рівняннях Больцмана [12]. У ньому розглядають імовірнісний розподіл частинок, що перебувають у розрахунковій комірці, та їхніх швидкостей у кожний момент часу з урахуванням їх зіткнень. Для врахування зміни розподілу частинок, створеного цими зіткненнями, у методі ґрат Больцмана використано інтеграл зіткнень у наближенні ВГК.

Метод молекулярної динаміки заснований на чисельному розв'язанні класичних рівнянь руху частинок у деякому виділеному об'ємі середовища. Для кожного атома записують рівняння руху у вигляді другого закону Ньютона. Передбачається, що всі сили мають потенційний (консервативний) характер і внески в потенційну енергію не залежать від конфігурації молекул. Миттєву температуру при моделюванні цим методом визначають як середню кінетичну енергію, що припадає на один ступінь свободи розрахункової системи. Температуру середовища визначають усередненням її миттєвих значень за деяким інтервалом часу.

Дисипативна динаміка частинок (DPD) покликана описувати гідродинаміку рідини, течію рідин. Під дисипативною частинкою мають на увазі маленьку краплю рідини. На відміну від методу молекулярної динаміки, що враховує тільки консервативні сили, метод динаміки дисипативних частинок ураховує три види сил: консервативні, дисипативні й випадкові (броунівські). До дисипативних сил відносять сили тертя з навколишнім середовищем, а випадкові сили враховують вплив навколишніх частинок (наприклад, зіткнення між частинками). Модель замикається виразом, що пов'язує дисипативні й випадкові сили.

Щоб уникнути труднощів, пов'язаних з гідродинамічними взаємодіями між твердими частинками, Танака і Аракі запропонували новий метод моделювання (метод гідродинаміки частинок, FPD) для незаряджених колоїдних суспензій, в якому молекули рідини розглядаються як нерозривне рідке середовище. Ключовою особливістю цього

методу є моделювання твердої колоїдної частинки як частинки рідини з високою в'язкістю, що не деформується.

Рідина, що містить незначну кількість (1–3 об.%) наночастинок деяких матеріалів, може в результаті зміни теплофізичних властивостей (теплопровідність, в'язкість, поверхневе тяжіння тощо) виявляти здатність до інтенсифікації процесів відведення теплоти від нагрітих поверхонь. В ІТТФ НАН України під керівництвом академіка НАН України А.А. Долінського розроблено ДІВЕ-технологію отримання подібних стабільних нанорідин [13]. Їхні гідродинамічні й теплофізичні властивості було досліджено теоретично на основі груп симетрії, що дозволило звести задачу до автотельної форми [14]. Нанорідини можуть бути широко застосовані в різних промислових технологіях, наприклад у металургії при загартуванні металевих виробів.

Для здійснення тепломасообмінних процесів у системах «тверде тіло – рідина» в Інституті розробили й виготовили мобільний агрегат типу «Фарматрон-3000».



Фарматрон-3000

Конструктивно в агрегаті передбачено можливість підключення до діючого на фармацевтичних підприємствах технологічного обладнання. Нині агрегат використовують для здійснення процесів диспергування й гомогенізації в процесі виготовлення препаратів для зовнішнього застосування: мазей, гелів, лініментів, та інших аерозольних препаратів.

За допомогою «Фарматрон-3000» вперше було отримано структуровані спиртові гелі. Вдалося прискорити процеси структурування в спиртовмісних системах, що вдвічі зменшило тривалість виробничого циклу, позбутися низки трудомістких операцій і поліпшити якість готового продукту.

Для виготовлення очних лікарських препаратів з рідинним дисперсійним середовищем спеціалістами Інституту було розроблено й виготовлено установку «Микротрон», яка включає дві стадії подрібнення дисперсних частинок. Особливість такої установки полягає в тому, що м'які лікарські форми з розміром твердих частинок не більше ніж 10 мкм не травмують рогівку ока.

ЕКСТРАКЦІЯ

У технологіях ДІВЕ часто реалізують осцилювальні режими течії, зокрема в пульсаторах (екстракція). У дослідженнях турбулентності на основі ренормгрупового (RNG) підходу аналіз проводили з припущенням, що вся нестационарність процесу полягає у високочастотних турбулентних пульсаціях. Це давало змогу під час оцінювання інтегралів за хвильовими числами, що виникають через використання $(d+1)$ -вимірною перетворення Фур'є, обмежуватися енергетичною межею, коли частота прямує до нуля. Таке спрощення призводить до неврахування нестационарних процесів, що відбуваються повільно (порівняно з турбулентними пульсаціями), характерних для реальних процесів гідродинаміки. Модифікована нестационарна RNG-модель дозволяє усунути цей недолік і врахувати безпосередньо нестационарність самого потоку.

Гідродинамічні, тепло- і масообмінні процеси в екстракторах можна розглядати як процеси в пористих середовищах. Одним із способів моделювання турбулентності в таких середовищах є метод ренормалізаційної групи [15]. У разі пористого середовища цей метод дозволяє виявити фізичну суть впливу складової Форхаймера на закономірності турбулентного потоку без залучення емпіричної інформації, а також урахувати вплив складової Дарсі на ефективну в'язкість. Для визначення критерію виникнення турбулентності в пористих середовищах можна застосувати або лінійний метод збурень (нестійкість Орра — Зоммерфельда) [16], або нелінійну модель нестійкості Лоренца.

Абсорбційні процеси насичення рідини розчинними в ній газами досить поширені в харчовій промисловості, хімічних та біотехнологіях, технологіях кондиціонування природних і стічних рідин, аерації рибогосподарських водосховищ. У багатьох випадках процес абсорбції є визначальним для техніко-економічних показників технологій. У роботах [17, 18] представлено нову абсорбційну технологію і обладнання для газування (сатурації) безалкогольних напоїв і шипучих вин. Цей процес потребує значних енергозатрат. У ІТТФ НАН України проведено теоретичні й експериментальні дослідження гідродинаміки і тепломасообміну в пневмопульсаційному апараті камерного типу, на базі яких розроблено технологію й устаткування для диспергування газу в рідині та прискорення процесу розчинення газу з використанням принципу ДІВЕ. Процеси гідродинаміки й теплообміну в пневмопульсаційному екстракторі адекватно описуються ренормгруповою $(k-\varepsilon)$ -моделлю турбулентності.

Розроблено принципово нову енергоощадну технологію швидкісної сатурації напоїв та установку синхронно-змішувального типу продуктивністю 7000 літрів газованого напою за годину. Нова технологія газування напоїв порівняно з традиційною забезпечує насичення води CO_2 за 18–20°C, а також зниження на 70% електричної потужності

лінії виробництва газованих напоїв завдяки невикористанню холодильного обладнання та зниження на 50% потужності сатураційних насосів. Цю технологію можна використати в інших галузях промисловості для створення нових енергоощадних абсорбційних технологій.

ГРАНУЛЯЦІЯ

Для виробництва гранульованих продуктів широко використовують процеси диспергування рідких середовищ. Проте їх реальна ефективність залежить від монодисперсності одержуваних частинок. Значного підвищення ефективності цих процесів досягають, застосовуючи вібраційне диспергування рідини, яке ґрунтується на збудженні вимушеного розпаду струменів за допомогою модуляції швидкості витікання рідини і забезпечує одержання потоків крапель із складом, близьким до монодисперсного.

Для розрахунків процесів грануляції використано квазігомогенну математичну модель на основі рівняння Нав'є–Стокса з урахуванням сил поверхневого натягу. Модель замикається виразом для щільності середовища в розрахунковій комірці залежно від значень об'ємних фракцій кожної фази. При цьому фази мають бути взаємно непроникними. Для кожної комірки сума об'ємних фракцій усіх фаз становить одиницю. Поверхня поділу між фазами визначається відповідно до розв'язку рівняння нерозривності для об'ємної фракції кожної фази.

ВПРОВАДЖЕННЯ ПРИНЦИПІВ ДІВЕ У ПРОМИСЛОВОСТІ

На сьогодні як в Україні, так і за кордоном впроваджено тисячі різноманітних пристроїв і апаратів, що ґрунтуються на принципі ДІВЕ. Наприклад, разом з Інститутом проблем лиття НАН України впроваджено устаткування пневмопульсаційного перемішування рідких металів та металів, що кристалізуються, для інтенсифікації тепломасообміну в об'ємі, вирівнювання градієнта температур і усереднення хімічного складу зливків, інтенсифікації теплообміну з на-

Табл. 1.
Характеристики апаратів, що працюють за принципом ДІВЕ

Апарати	Технологія ДІВЕ							
	Змішування	Гомогенізація	Екстракція	Дегазація	Емульгація	Подрібнення	Концентрування	Грануляція
Роторно-пульсаційний апарат	x	x	x	x	x			
Вакуумний гомогенізатор	x	x		x				x
Вакуумний емульгатор	x			x	x			x
Вакуумний дегазатор		x		x				x
Пульсатор	x	x	x				x	
Імпульсний екстрактор	x		x				x	
Гранулятор								x
Кавітатор	x	x		x			x	

Табл. 2.
Застосування математичних моделей у різних технологіях ДІВЕ

Модель	Технологія ДІВЕ				
	Змішування	Гомогенізація	Екстракція	Диспергування	Ферментація
Долінського–Іваницького	x	x	x		
Накорчевського–Баска		x			
Нестійкості Орра–Зоммерфельда	x		x		
Відцентрової нестійкості мікротечій	x				
RNG турбулентності	x		x		x
Розпаду струменя					x
Групові методи		x			
MD	x				x
DPD	x	x			x
LBM	x				
Нестійкості Лоренца				x	x

вколишнім середовищем, руйнування фронту кристалізації. Разом із Фізико-технологічним інститутом металів і сплавів НАН України проведено випробування пневмопульсаційного перемішування рідкої фази сталевого зливка масою 19,5–23,0 т на металургійному комбінаті «Азовсталь». З використанням розробленого методу перемішування виконано дослідження з отримання синтетичного ливарного чавуну на Донецькому металургійному заводі і з позапічного оброблення сталі – на підприємстві «Kawasaki Steel» в Японії.

Крім того, принцип ДІВЕ успішно використовують у багатьох дослідних організаціях для створення високопродуктивних та енергоощадних промислових апаратів. У Тамбовському державному технічному університеті (Росія) на основі дослідження кавітаційних явищ у роторних апаратах розроблено узагальнену методіку розрахунку та оптимізації таких апаратів. У Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя досліджують вплив гідродинамічних характеристик кавітаційного обладнання на ефективність оброблення технологічних середовищ, енергетичні аспекти використання гідродинамічних кавітаційних пристроїв у технологічних процесах. У Сибірському федеральному університеті (Красноярськ) вивчають процеси тепломасообміну в суперкавітаційному випарнику з відбором пари в потоці. Найхарактернішим прикладом практичної реалізації принципу ДІВЕ є створення промислового ферментатора зі скиданням тиску. Модернізація ферментатора за методом ДІВЕ дала змогу скоротити питомі витрати енергії на 1,0–1,5 кВт·год/м³, зменшити на 50% кількість води, що витрачається на охолодження, і практично виключити витрати піногасника. Продуктивність апарата, що працює за цим методом, зростає на 20%. Було виготовлено і успішно впроваджено на Саранському заводі медичних препаратів (Росія) два апарати з об'ємом реактора 16 і 63 м³. Довготривала експлуатація показала їхні високі експлуатаційні характеристики.

В табл. 1 наведено характеристики апаратів, створених для реалізації відповідних технологій, які ґрунтуються на принципі ДІВЕ. Застосування сучасних математичних моделей і підходів для дослідження нанопроцесів у різних технологіях ДІВЕ наведено в табл. 2.

Практичне використання принципів ДІВЕ під час створення і застосування нанотехнологій і наноматеріалів неможливе без проведення комплексних експериментальних досліджень з виявлення фундаментальних механізмів самоорганізації наноструктур, а також способів реалізації процесів, які забезпечують необхідні функціональні характеристики нових матеріалів.

Для подальших досліджень багатофакторних систем, очевидно, слід якомога ширше використовувати спектр усіх наявних моделей, підходів, методів і процедур. Без сумніву, це буде однією з умов успішного вирішення багатьох фундаментальних і прикладних проблем, які стоять сьогодні перед наукою.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах: теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии. — К.: Наук. думка, 2008. — 381 с.
2. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. 1. Модель динамики одиночного парового пузырька // Пром. теплотехника. — 1995. — Т. 17, № 5. — С. 3–28.
3. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. 2. Исследование поведения ансамбля паровых пузырьков // Пром. теплотехника. — 1996. — Т. 18, № 1. — С. 3–20.
4. Долинский А.А., Накорчевский А.И. Вскипающие адиабатные потоки через сужающие устройства // Пром. теплотехника. — 1988. — Т. 10, № 6. — С. 9–13.
5. Долинский А.А., Басок Б.И., Накорчевский А.И. Адиабатные вскипающие потоки. — К.: Наук. думка, 2001. — 207 с.
6. Накорчевский А.И., Басок Б.И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках. — К.: Наук. думка, 2001. — 348 с.

7. *Шурчкова Ю.А.* Адиабатное вскипание. Практическое использование. — К.: Наук. думка, 1999. — 208 с.
8. *Долинский А.А., Басок Б.И., Гульй С.И. и др.* Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях. — К.: ИТТФ НАНУ, 1996. — 207 с.
9. *Долинский А.А., Авраменко А.А., Басок Б.И., Кузнецов А.В.* Биоконвективные эффекты в процессах ферментации // Пром. теплотехника. — 2005. — Т. 27, № 5. — С. 5–10.
10. *Тыринов А.И.* Численное моделирование гидродинамики цитокинеза // Промышленная теплотехника. — 2011. — Т. 33, № 1. — С. 38–41.
11. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V.* Instability of a slip flow in a curved channel formed by two concentric cylindrical surfaces // Eur. J. Mech. B. — 2009. — V. 28, № 6. — P. 722–727.
12. *Тыринов А.И., Авраменко А.А., Басок Б.И., Давыденко Б.В.* Моделирование течения в микроканале на основе решетчатого уравнения Больцмана // Инженерно-физический журнал. — 2012. — № 1. — С. 59–65.
13. *Долинский А.А., Грабов Л.Н., Грабова Т.Л.* Метод ДИВЭ в инновационных технологиях и теплообменном оборудовании // Пром. теплотехника. — 2012. — Т. 34, № 3. — С. 18–30.
14. *Avramenko A.A., Blinov D.G., Shevchuk I.V.* Self-similar analysis of fluid flow and heat-mass transfer of nanofluids in boundary layer // Phys. Fluids. — 2011. — V. 23. — P. 082002(1–8).
15. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V.* Renormalization group model of macroscopic turbulence in porous media // Transp. Porous Media. — 2006. — V. 63. — P. 175–193.
16. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Basok B.I., Blinov D.G.* Investigation of stability of a laminar flow in a parallel-plate channel filled with a fluid saturated porous medium // Phys. Fluids. — 2005. — V. 17. — P. 094102(1–6).
17. *Долинский А.А., Басок Б.И., Шетанков О.К., Чайка А.И.* Энергосберегающие абсорбционные технологии в производстве газированных напитков // Пром. теплотехника. — 2001. — Т. 23, № 4–5. — С. 137–140.
18. *Dolinsky A.A., Tyrinov A.I., Avramenko A.A., Basok B.I. et al.* Numerical simulation of water jet breakup under the influence of flow velocity oscillations // J. Eng. Thermophys. — 2008. — V. 17, N. 2. — P. 130–133.

Стаття надійшла 02.04.2013 р.

А.А. Долинский, А.А. Авраменко, Г.К. Иваницкий
Институт технической теплофизики НАН Украины
ул. Желябова, 2а, 03680, Киев, Украина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ И МЕТОДОВ ДИВЭ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КИНЕТИКОЙ ПРОТЕКАНИЯ НАНОУРОВНЕВИХ ПРОЦЕССОВ

Представлен обзор теоретических основ и прикладных методов теплообмена при дискретно-импульсном вводе энергии в дисперсные среды. Рассмотрены технологии, основанные на принципе дискретно-импульсного ввода энергии: смешивании, гомогенизации, экстракции, дегазации, эмульгации, измельчении, концентрировании и грануляции. Приведены примеры высокопроизводительных и энергосберегающих промышленных аппаратов, использующих этот принцип. Рассмотрены перспективы развития и практического использования принципов дискретно-импульсного ввода энергии при создании современных нанотехнологий и наноматериалов.

Ключевые слова: теплообмен, дискретно-импульсный ввод энергии, гомогенизация, эмульгация, грануляция.

A.A. Dolinsky, A.A. Avramenko, G.K. Ivanitsky
Institute of Engineering Thermophysics
of National Academy of Sciences of Ukraine
2a Zhelyabov Str., 03680, Kyiv, Ukraine

USING THE TOOLS AND TECHNIQUES OF DIIE METHOD FOR CONTROL OF THE KINETICS OF NANO-LEVEL PROCESSES

Review of the theoretical foundations and applied methods for heat and mass transfer of discrete-impulse input of energy in a dispersion medium is presented. The technology which is based on the principle of discrete-impulse input of energy is considered: mixing, homogenization, extraction, decontamination, emulsification, grinding, concentrating and pelletizing. The examples of high-performance and energy-efficient industrial machines using this principle are given. The prospects for the development and practical using the principles of discrete-impulse input of energy in creating modern nanotechnology and nanomaterials are considered.

Keywords: heat and mass transfer, discrete-impulse input of energy, homogenization, emulsification, granulation.