

ІМПУЛЬСНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Відомо, що понад 75 % хіміко-технологічних процесів пов'язано з використанням операції перемішування. Інтенсивність і тривалість цієї операції визначає, в основному, металомісткість та енергоємність технологічного обладнання, а також властивості, якість та вихід отриманих продуктів. Співробітники кафедри процесів та апаратів НУХТ, кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування НТУУ "КПІ" та МП "Екрес" спільно розробили на основі принципів імпульсного введення енергії статичні, пульсаційно-статичні та динамічні змішувачі (відповідно СЗ, ПСЗ та ДЗ). Впровадження таких турбулентних реакторів дає змогу створювати нові покоління технологій надшвидких хіміко-технологічних процесів, підвищувати питому продуктивність технологічного обладнання на 2-3 порядки при значному зменшенні його енергоємності та металомісткості. Крім того, зазначені апарати за своєю гідродинамічною структурою потоків близькі до реакторів повного витіснення на відміну від апаратів, які обладнані механічними перемішувальними пристроями. А як відомо, при проведенні масообмінних процесів рушійна сила в реакторах повного витіснення значно (при високому ступені перетворення — у десятки разів) перевищує рушійну силу в реакторах повного змішування.

Принципи імпульсного введення енергії в робочі (реакційні) зони технологічних апаратів реалізовано в конструкціях таких технологічних апаратів:

пульсаційні статичні (ПСЗ), кавітаційні (КЗ), гідروفонтанні (ГФЗ) та комбіновані змішувачі (гомогенізатори, емульгатори та диспергатори);

пульсаційні рідинні фільтри з протитечіюною, обмивною та комбінованою системами регенерації фільтрувальних перегородок;

колонні, конічні секційні (прямо- та протитечіюні) рідинні та твердофазні екстрактори і сорбери;

комбіновані установки для розчинення мінеральних та органічних полідисперсних часток, що містять до 30 % нерозчинних домішок;

пульсаційні, у тому числі з попереднім газонасиченням, розпилювальні пристрої для спалювання паливних емульсій і проведення процесів аб- і десорбції;

пульсаційні трубчасті теплообмінники для нагрівання (охолодження) в'язких і накипоутворювальних рідин, а також фракційні та масові кристалізатори.

Робочі зони (РЗ) вищеперерахованих апаратів оснащені перспективними конструкціями ПСЗ, КЗ і ГФЗ або окремими елементами їх, а також принципово новою гідродинамічною системою створення пульсацій в робочій зоні за допомогою гідропульсаторів (ГП). Принципові схеми імпульсного введення енергії наведено на рис. 1.

Пульсаційні статичні й кавітаційні змішувачі виготовляють у вигляді окремих циліндричних секцій діаметром 0,03...2,0 м і більше і 0,1...3,0 м завдовжки, які оснащені струминно-вихровими насадками, що забезпечують закручування та співударяння струменів. Корпуси змішувачів можуть мати оболонку для циркуляції теплоносія, а насадки та корпуси можуть виготовлятися з будь-якого металу, пластмас, скла та інших конструкційних матеріалів.

В.М. Гладкий, О.М. Тимонін,

кандидати техн. наук

Національний технічний
університет України "КПІ"

А.В. Копиленко, канд. техн. наук

Національний університет
харчових технологій

Виконання елементів насадок суперкавітуючого профілю та організація відповідних "жорстких" гідродинамічних режимів сприяють створенню в потоці штучних суперкавітаційних порожнин (кавери), які генерують у подальшому потоці значну кількість ($10^6 \dots 10^9$ шт./ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) кавітаційних бульбашок, що надалі руйнуються в потоці. Зони руйнування (1...50 мкм) являють собою розташовані в об'ємі потоку "мікрореактори", тиск в яких збільшується до 0,5 ГПа, а температура — до 1000 °С і вище. Крім того, за умов несферичного руйнування кавітаційних бульбашок, виникають високошвидкісні мікрострумені, розриваються міжмолекулярні зв'язки, відбувається іонізація парогазової суміші, виникає люмінесцентне світіння.

Конструкція гідропульсаторів дає змогу створювати пульсвні потоки (рис. 1, а, в) або накладати пульсації об'ємної швидкості на потік у робочій зоні реактора (рис. 1, б, г) із заданою наперед найоптимальнішою для відповідного процесу формою, частотою ($\tau_1/\tau_2 = 1 \dots 10^3$) та амплітудою ($W_1/W_2 = 1 \dots 50$, $W_1/W = 0,1 \dots 20$) прямих і зворотних імпульсів. За цих обставин у робочій зоні створюються високі локальні швидкості при відносно низькій середньовитратній швидкості потоку, що забезпечує високу інтенсивність перемішування, кратність рециркуляції та збільшує тривалість перебування компонентів середовища в робочій зоні. З'єднання гідропульсатора із входом та виходом ро-

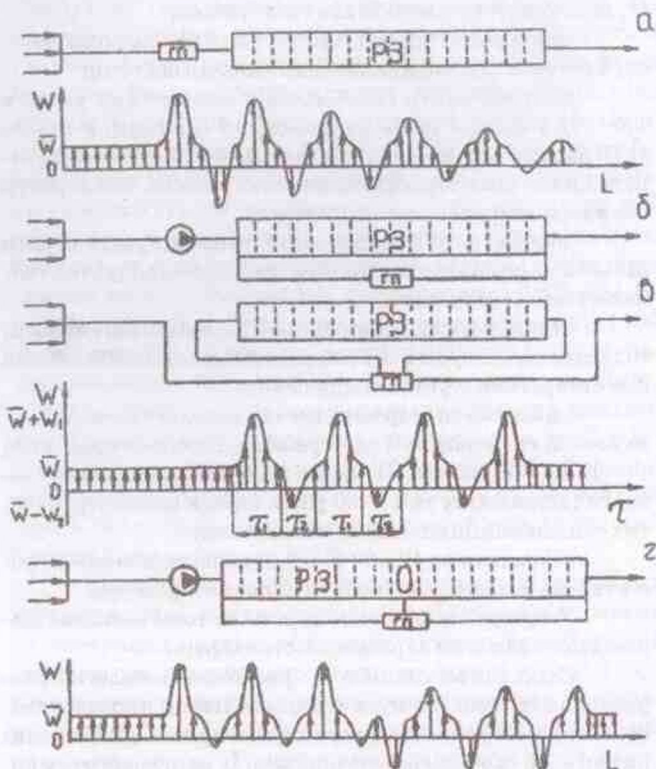


Рис. 1. Принципові схеми технологічних апаратів (ТА) з імпульсним введенням енергії та характер зміни швидкості в робочих зонах (РЗ) апаратів: а, б, г — ТА для перемішування, диспергування, екстракції, аб- і адсорбції (а, б — $PZ \text{ з } L/D < 6$, г — $L/D > 6$); в — теплообмінники, кристалізатори; ГП — гідропульсатор, L — довжина РЗ, D — діаметр РЗ; W , W_1 , W_2 — середньовитратна і пульсаційні швидкості потоку в РЗ; τ_1 , τ_2 — тривалості прямого та зворотного імпульсів відповідно

бочої зони (рис. 1, б, в, г) запобігає затуханню пульсацій по її довжині. Створення в робочій зоні зустрічних (різонапрямлених) синхронних пульсацій (рис. 1, г) компенсує (взаємно поглинає) інерційні навантаження на опори апаратів. Компонування "в" дає змогу інтенсифікувати конвективний теплообмін і знизити ріст відкладень, а компонування "а" — забезпечити промивання пор фільтрувальних перегородок зворотним потоком фільтрату. З'єднання входу гідропульсатора з місткостями перемішуваних компонентів, а його виходу — із входом робочої зони забезпечує безперервне циклічне дозування компонентів, при цьому співвідношення їх регулюється внаслідок зміни амплітуди чи частоти пульсацій.

Як свідчать проведені дослідження [1, 2], обробка технологічних розчинів в СЗ, ПСЗ і ДЗ сприяє інтенсифікації технологічних процесів, що зумовлюється впливом ряду інтенсифікувальних факторів і ефектів:

турбулізації потоку і пристинного шару за умов створення гідродинамічної нестационарності, закручування та співударяння пульсівних струменів;

кавітаційно-кумулятивного ефекту та високоінтенсивних мікрівихорів, що виникають при створенні та руйнуванні кумулятивних мікроструменів;

акустичних, звукових та ультразвукових коливань, прискорення фізико-хімічних перетворень у зонах локального тиску, температур, під впливом іонізації і люмінесцентного випромінювання;

супутніх ефектів вібротурбулентності та "випрямленої" дифузії.

Використання впливу окремих або комплексних факторів інтенсифікації хіміко-технологічних процесів, що наведені вище, дає змогу:

створювати нормалізовані ряди уніфікованих апаратів у широкому діапазоні продуктивності, в'язкості, тиску та температури речовин, що обробляються, — від газів до високов'язких рідин і сипких матеріалів, які можуть подаватися насосом або газодувкою;

створювати гнучкі, що легко переналагоджуються, блочно-модульні хіміко-технологічні системи;

прискорювати (залежно від конкретних умов) в 1,5–100 і більше разів технологічні процеси, а також здійснювати за нормальних умов ряд фізико-хімічних перетворень, що потребують високих тисків, температур або високоактивних каталізаторів;

збільшувати концентрацію та зменшувати втрати цільових компонентів у продуктах і напівпродуктах технологічних виробництв;

отримувати високостабільні (5...8 тис. год) емульсії, тонкодисперсні суспензії, забезпечуючи за 30...300 с більш ніж стократний ступінь подрібнення;

здійснювати безреагентне та "холодне" знезараження стоків, стерилізацію і пастеризацію харчових продуктів;

підвищувати в 1,5–8 разів інтенсивність конвективного теплообміну та в 3–50 разів термін роботи трубчастих теплообмінників між їх очищенням;

збільшити на 40...60 % продуктивність та в 6–40 разів термін безперервної роботи напорних фільтрів.

Усі розробки виконано на рівні світової новизни і відповідають вимогам державних стандартів.

Спільно з асоціацією "Укрводоканалекологія" розроблено статичні змішувачі для реалізації процесів змішування коагулянтів і флокулянтів при кондиціонуванні питної води та очищенні стічних вод. Їх виготовляють у вигляді окремих циліндричних модулів, оснащених струмінно-вихоровими насадками, що сприяють закручуванню та співударянню струменів, і встановлюють безпосередньо на трубопроводах. Змішувачі забезпечують швидко (0,5...3,0 с) та рівномірне (99,0...99,9 %) розподілення коагулянту або флокулянту, що, у свою чергу, сприяє

"обволіканню" практично всіх часток суспензії продуктами гідролізу коагулянту або високомолекулярними речовинами флокулянту, накопиченню в об'ємі оброблюваної води великої кількості твердої фази, формуванню міцних, густих і великих пластівців, що швидко осідають. Це дає можливість автоматизувати процес і підтримати оптимальну дозу коагулянтів або флокулянтів у широкому діапазоні витрат оброблюваної води та її вихідного складу. Подібні за конструкцією змішувачі можна використовувати для проведення технологічних процесів, пов'язаних з перемішуванням контактуючих середовищ у хімічній, нафтохімічній, целюлозно-паперовій, харчовій та інших галузях промисловості.

У виробництвах хлору та каустичної соди на Первомайському, Саянському ВО "Хімпром" та інших підприємствах впроваджено установку для розчинення полідисперсних ($d_{max}/d_{min} \geq 10^4$) мінеральних та органічних часток. Установа (рис. 2) складається з гідрофонтанного (ГЗ) та пульсаційного статичного (ПСЗ) змішувачів, гідропульсатора (ГП), гідрокласифікатора (ГК) і пристрою для відмивання нерозчинних домішок (ВД). Проведення процесу розчинення в цій установці порівняно з його реалізацією в апаратах з механічними або пневматичними пристроями дає змогу отримувати висококонцентровані ($C/C_0 > 0,99$) розчини, знизити у 6–8 разів металомісткість, у 7–11 разів енергоємність обладнання і у 10–12 разів виробничі площі [1].

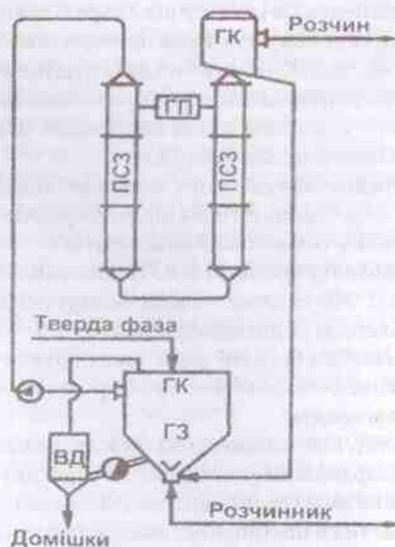


Рис. 2. Установа для розчинення:

ГЗ — гідрофонтанний змішувач;
 ПСЗ — пульсаційний статичний змішувач;
 ГП — гідропульсатор; ГК — гідрокласифікатор;
 ВД — пристрій для відмивання нерозчинних домішок

У процесах очищення каустичної соди від кристалів хлориду натрію застосовують фільтри патронні пульсаційні (ФПП), які призначені для безперервного фільтрування суспензій в різних галузях промисловості. Безперервну протитечійну, обмивну та комбіновану регенерацію фільтра здійснюються за допомогою гідропульсатора, встановленого на трубопроводі підведення суспензії або відведення фільтрату. Зміною тривалості та інтенсивності зворотних (промивних) імпульсів досягається повне скидання осаду або його розрихлення. Протитечійна регенерація сприяла збільшенню на 47 % продуктивності та у 3–4 рази тривалості безперервної роботи фільтра.

Апаратами нового покоління є розроблені авторами спільно з ВАТ "Сумський завод "Насосенергомаш" роторно-пульсаційні кавітаційні апарати (РПКА) — енергоощадні проточні апарати багатопільового призначення з роторно-

пульсаційними та кавітаційними перемішувальними пристроями (рис. 3), що дають можливість значно підвищити



Рис. 3 Роторно-пульсаційні та кавітаційні перемішувальні пристрої РПКА

якісні показники процесів гомогенізації та диспергування у багатокомпонентних середовищах. РПКА виготовляють у вигляді агрегатів, що включають електричний привід, вбудовані в загальний корпус робочі колеса відцентрового насоса та комбіновані диспергувальні або гомогенізаційні елементи. На відміну від загальновідомих статичних, динамічних і кавітаційних диспергаторів, що потребують додаткового використання насоса для перекачування рідини, РПКА об'єднує в одному корпусі як перекачувальні, так і диспергувальні (гомогенізаційні) елементи, що мають один загальний привід. Із значним економічним ефектом РПКА можуть використовуватися у виробництвах:

- фруктових соків, майонезів, соусів, есенцій, молочних сумішей, дитячого харчування, переробці харчових відходів; вітамінних препаратів, настоянок, екстрактів; шампунів, кремів, лосьйонів, рідких мийних та інших очищувальних засобів;
- лаків та фарб при диспергуванні пігментів та інших наповнювачів;
- мастильних матеріалів при компаундуванні присадками;
- фотоемульсій, емульсій для магнітних стрічок і дисків;
- водопаливних емульсій (мазут—вода, бензин—вода тощо).

Роторно-пульсаційні кавітаційні апарати виготовляють за конкретними замовленнями споживачів ВАТ "Сумський завод "Насосенергомаш" на базі насосів продуктивністю від 0,4 до 1000 м³/год і більше, що випускаються серійно.

Щоб підвищити економічну ефективність спалювання рідкого палива (частка рідкого палива, що використовується як енергоносіє, становить в Україні близько 10 %) та знизити кількість шкідливих твердих і газових викидів у довкілля, автори розробили технологію та апаратне оформлення для реалізації процесів приготування і спалювання паливних емульсій. Технологія включає двоступеневу систему приготування паливних емульсій з органічними або мінеральними розчинними присадками, активацію і деструкцію (мікрокрекінг) високомолекулярних вуглеводних фракцій (ВВФ). Крім того, ця технологія дає можливість утилізувати рідке паливо та термічно знешкодити токсичні промислові викиди (ТПВ). Найбільша кількість ТПВ утворюється на підприємствах чорної металургії, нафтохімії і нафтопереробки, а також у целюлозно-паперовій, хімічній, харчовій і паливній промисловості. Технологія дає можливість також ліквідувати стічні води ТЕС, котельні та сховищ пальномастильних матеріалів. Запропонована технологія забезпечує:

- економію (2...5 %) рідкого палива;
- зменшення до 1,01...1,05 коефіцієнта надлишку повітря (КНП);
- зниження (до 80...90 %) кількості відкладень на зовнішніх поверхнях нагріву котлів;
- зменшення (у 2–3 рази) вмісту оксидів сірки, азоту та практично повну ліквідацію СО, метану і сажистого вуглецю у продуктах згоряння.

Розроблена технологія та обладнання забезпечують також приготування і спалювання емульсій із нетрадиційних горючих компонентів: ріпакової олії, відпрацьованих технічних мастил тощо.

На першому ступені приготування паливних емульсій, де отримують тонкодисперсні і високостабільні (3000...8000 год) емульсії у витратних резервуарах, використовують роторно-пульсаційні кавітаційні апарати (РПКА). На другому ступені використовують проточні статичні або соєлові кавітаційні диспергатори (СКД), що не мають рухомих елементів і встановлюються безпосередньо на вході в топку або камеру згоряння. Місце розміщення СКД зумовлено тим, що при проходженні попередньо емульгованого в РПКА палива через робочі зони СКД розмір крапель зменшується до 1...3 мкм, одночасно відбувається активація палива і деструкція ВВФ, а час релаксації активованих радикалів становить від 7...9 до 40...60 с.

Залежно від потужності теплової установки (котла, печі або двигуна) та об'єму витратного резервуара РПКА і СКД виготовляють з різною продуктивністю.

Ефективність диспергування у РПКА та СКД досягається завдяки багатоступеневому комплексному впливу поліградієнтних фізичних полів на середовища, що обробляються. Це, у першу чергу, напруження звуку і розтягу, пружні коливання звукового та ультразвукового спектрів частот, кавітаційно-кумулятивний ефект. Питома потужність, яка підводиться до одиниці об'єму оброблюваного середовища, становить 10⁴...10⁵ кВт/м³, що на декілька порядків більше від дисипації енергії, яка виділяється при обробленні технологічних розчинів в ультразвукових апаратах, дезінтеграторах, вібротрилах, апаратах із вихровим шаром тощо [2].

Ефективність спалювання досягається завдяки цілій низці факторів. Так, коли крапля паливної емульсії з температурою понад 400 К входить із форсунки в зону факела, дисперговані у паливі мікрокраплі дуже швидко ("вибухово") випарюються і повторно подрібнюються. Таким чином, паливо з повітрям інтенсивно перемішуються і значно, в десятки і сотні разів, збільшується міжфазна поверхня. Наведені фактори можуть суттєво (до 1,01...1,05) зменшити КНП при практично нульових втратах від хімічного і механічного недопалу. Досліди, що проводились в Інституті газу НАНУ, та накопичений досвід спалювання мазуту з малим і гранично малим надлишком повітря показують значне зменшення вільного кисню в ядрі та на межі факела і, як наслідок, зменшення токсичних і агресивних газових викидів. Наприклад, при зменшенні КНП від 1,08 до 1,01 концентрація оксидів азоту зменшується від 1100 до 400 мг/м³. Крім того, розрахунки свідчать, що при спалюванні паливних емульсій коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням продуктів згоряння підвищується внаслідок збільшення ступеня чорноти триатомних газів, який залежить від їх парціального тиску. Об'єм продуктів згоряння практично не підвищується, а збільшення об'єму водяної пари в них компенсується зменшенням об'ємів азоту і кисню внаслідок зниження КНП.

Одним із факторів, який значною мірою впливає на витрату палива, є різке зменшення кількості відкладень на поверхнях нагріву або запобігання цьому. Поряд із значним зменшенням утворення сажистого вуглецю внаслідок інтенсифікації процесу перемішування та збільшення міжфазної поверхні, додавання органічних або мінеральних водорозчинних присадок зв'язує сірку, зменшує високо- і низькотемпературну (ванадієво-натрієву та сірчано-кислотну) корозію, а також суттєво знижує адгезійні властивості відкладень на хвостових поверхнях нагріву. При цьому температура вихідних газів з часом практично не зростає. А як відомо, у сучасних котлах основні втрати теплоти пов'язані з викидом в атмосферу продук-

тів згоряння. Ці втрати становлять 5...7 % при чистих поверхнях нагріву, а в разі наявності відкладень втрати теплоти з вихідними газами зростають до 18 % і більше.

Доцільно зазначити також, що із загальновідомих методів підвищення ефективності спалювання рідкого палива та розширення діапазону регулювання теплових установок, таких як паромеханічне розпилювання, здвоєні форсунки, рециркуляція палива і димових газів, підвищення температури і тиску палива перед форсунками, метод спалювання емульгованого палива є найуніверсальнішим і потребує найменше коштів.

Висновки. На засадах імпульсних технологій розроблено і впроваджено у виробництво високоефективні апарати багатоцільового призначення для процесів змішування, диспергування та емульгування в хімічній, харчовій і багатьох інших галузях промисловості. Статичні, пульсаційно-статичні та динамічні змішувачі, роторно-пульсаційні кавітаційні апарати, що розроблені на прин-

ципах імпульсного введення енергії, дають змогу створювати нові покоління технологій надшвидких хіміко-технологічних процесів, підвищувати якість кінцевих продуктів виробництва та питому продуктивність технологічного обладнання при значному зменшенні його енергоємності та металомісткості.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Гладкий В.Н.* Процессы растворения полупродуктов хлорных производств в аппаратах гидродинамическим перемешиванием: Рукопись дис... канд. техн. наук — К., 1996. — 284 с.

2. *Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности / Под ред. И.М. Федоткина* — К.: Полиграфкнига, 1997. — 530 с.

Надійшла до редколегії 15.05.02 р.