

14. Cox, J. D. Values for Thermodynamics [Text] / J. D. Cox, D. D. Wagman, V. A. Medvedev. — New York: Hemisphere Publishing Corp., 1989. — 271 p.
15. Ривкин, С. Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара [Текст]: справочник / С. Л. Ривкин, А. А. Александров. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 80 с.

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АУДИТ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ НІТРОСУМІШІ ДЛЯ НІТРУВАННЯ БЕНЗОЛУ І ТОЛУОЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕКОНЦЕНТРОВАНОЇ НІТРАТНОЇ КИСЛОТИ

Досліджено за допомогою методів математичного моделювання можливості та доцільності використання неконцентрованої азотної кислоти для приготування нітросумішей для нітрування бензолу і толуолу з одночасним локальним концентруванням відпрацьованої кислоти. Показано, що локальний процес концентрування відпрацьованої кислоти до необхідної робочої концентрації виявляється більш вигідним, ніж централізоване концентрування до 92–96 %-ної кислоти.

Ключові слова: математичне моделювання, бензол, толуол, нітрування, концентрування, нітросуміш, локальний процес, відпрацьована кислота.

Красильникова Анна Александровна, аспірант, Інститут хімічних технологій Восточноукраїнського національного університету ім. В. Даля, Рубежное, Україна, e-mail: krasina@list.ru.
Кондратов Сергей Алексеевич, доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри вищої математики та комп'ютерної технології, Інститут хімічних технологій Восточноукраїнського національного університету ім. В. Даля, Рубежное, Україна, e-mail: kondratovsa@gmail.com.

Красильникова Анна Олександрівна, аспірант, Інститут хімічних технологій Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, Рубіжне, Україна.

Кондратов Сергій Олексійович, доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри вищої математики та комп'ютерних технологій, Інститут хімічних технологій Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, Рубіжне, Україна.

Krasynikova Anna, Institute of Chemical Technology Volodymyr Dahl's East Ukrainian National University, Rubizhne, Ukraine, e-mail: krasina@list.ru.

Kondratov Serhii, Institute of Chemical Technology Volodymyr Dahl's East Ukrainian National University, Rubizhne, Ukraine, e-mail: kondratovsa@gmail.com

УДК 66-9

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.38074

Васильєв М. І.

ПИТАННЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ МАСОБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПРОТІКАННІ РЕАКЦІЙ У СКЛАДНО-РЕАКЦІЙНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМАХ

У даній роботі на підставі дослідження теорії процесів тепломасопереносу, відомих моделей міжфазної тепломасопередачі конкретизована гідродинамічна сторона процесів переносу. Це дозволяє обґрунтовано підійти до методів інтенсифікації міжфазного переносу: механічний, пульсаційний, тепловий утворення-захлопування бульбашок, закручування та руху середовища по криволінійних каналах. Показано, що кожен метод може бути реалізований у відповідній конструкції апарату, розробка та дослідження цих конструкцій є перспективним напрямком.

Ключові слова: масообмінні процеси, інтенсифікація, гетерогенна система, міжфазна поверхня, інверсія фаз.

1. Вступ

Переважаюча кількість матеріальних технологій, що реалізуються в хімічній промисловості, відносяться до гетерогенних систем. Навіть такі технології, як рух і нагрівання води чи газу в каналі, ємності, є результатом взаємодії різнорідної пари — поточного середовища і твердого тіла. З технологічної точки зору найбільш значущі багатофазні системи з різними динамічними, термодинамічними, хімічними потенціалами взаємодіючих фаз, що зумовлює міжфазовий обмін масою, імпульсом, енергією, речовиною. Процеси міжфазного переносу перерахованих якостей складають основу всіх матеріальних технологій, вони є невід'язаними процесами (по одному або декільком з перерахованих вище якостей), що протікають в технологічних апаратах або

реакторах. Повною мірою до таких процесів, що протікають в технологічних апаратах, відносяться процеси, які спостерігаються в складно-реакційних гетерогенних системах. Оскільки гідродинамічна обстановка в апараті визначає інтенсивність вказаних процесів, то конкретика саме цих питань є актуальною задачею.

2. Аналіз літературних даних

Особливість складно-реакційних гетерогенних систем полягає в тому, що при русі через технологічний апарат, наприклад гомогенного або дисперсного середовища, за рахунок протікання ряду послідовних чи паралельних хімічних, фізичних перетворень, середовище стає трифазною системою, а в деяких випадках «чотирьохфазною». Останнє, згідно сучасним уявленням фізикохімії

агрегування тіл змінної маси [1, 2], пов'язано з наявністю в гетерогенній системі не тільки традиційних фазових компонентів «газ — рідина — тверде тіло», але і колоїдних нанокристалів. При цьому в складно-реакційній гетерогенній системі спостерігаються явища, коли виникнення та інтенсивний розвиток одного з паралельних або паралельно-послідовних процесів в загальній системі призводить до уповільнення або припинення іншого процесу [3]. Крім того, поява третьої або четвертої фази докорінно змінює структуру потоку в технологічному апараті, умови мікро- та макрозмішання, а також кінетичні константи основоположних процесів [4]. Типовими представниками складно-реакційних гетерогенних систем у технологічних апаратах хімічної промисловості, в яких з'являються вищевідзначені особливості, є процеси покладені в основу виробництва кальцинованої соди методом Сольве — процес карбонізації аміачно-соляного розчину в умовах, що виключають значну десорбцію аміаку, а потім карбонізації карбонат-бікарбонатних розчинів. Мова йде про колони карбонізації у виробництві соди.

Проведені дослідження процесів, що протікають в колоні [5–11], показали, що при карбонізації аміачно-соляного розчину максимальна швидкість абсорбції досягається тільки після уповільнення процесу десорбції NH_3 . Очевидно, що інтенсивно протікає в початковий період процес десорбції NH_3 гальмує процес абсорбції CO_2 . Після припинення десорбції аміаку відбувається одночасно абсорбція CO_2 та NH_3 , реакція між собою після поглинання їх в рідкій фазі, що викликає появу другого максимуму на кривій швидкості абсорбції CO_2 .

При карбонізації карбонат-бікарбонатних розчинів в результаті максимального пересичення розчину по бікарбонату натрію починається процес його кристалізації.

В період інтенсивного зняття пересичення по бікарбонату натрію процес абсорбції двоокису вуглецю практично припиняється, про що свідчить відсутність фіксованої зміни вмісту Na_2CO_3 в розчині. Уповільнення або повне припинення абсорбції CO_2 відбувається спонтанно. Дійсно, зняття пересичення по бікарбонату натрію викликає зниження рівноважного тиску CO_2 над карбонат-бікарбонатним розчином і збільшення рушійної сили процесу абсорбції CO_2 , що має сприяти підвищенню швидкості даного процесу. Проте насправді цього не спостерігається до тих пір, поки дещо не сповільниться процес кристалізації. При цьому система з двофазної «рідина — газ» переходить у трифазну «рідина — тверде тіло — газ», як наслідок зростає в кілька разів в'язкість системи, змінюються умови диспергування газоподібної фази в системі та інші ефекти.

При цьому поверхнева активність твердої фази, що утворюється (NaHCO_3) настільки велика, що хід процесу кристалізації залежить не тільки від наявності неконтрольованих домішок, а й значною мірою від рельєфу поверхні корпусу колони, контактних елементів, теплообмінної поверхні та їх конструкцій.

Мається на увазі, що тверда фаза NaHCO_3 осідає на вище зазначених поверхнях, відбувається інкрустація і заростання перерізу колони, як наслідок докорінно змінюється гідродинамічна обстановка в колоні і власне результат процесу. Слід зазначити, що колони в режимі карбонізації працює не більше 6–7 днів, наприкінці режиму вона заростає настільки інкрустаціями, що її переводять у режим промивки від осілого NaHCO_3 .

Іншим характерним прикладом протікання процесів в складно-реакційних гетерогенних системах є технологічний процес сатурації в цукробуряковому виробництві. В роботі [12] проведено порівняльний аналіз функціонування типових промислових апаратів для здійснення процесів сатурації, які в основному являють собою конструкції апаратів колонного типу. Авторами встановлено наявність аналогічних явищ, що описано вище. Наприклад до моменту початку кристалізації CaCO_3 утворюється колоїдна система з в'язкістю до 1–1,2 МПа·с, в цей момент швидкість сорбції CO_2 зменшується у 5–8 разів, і тільки після деструкції колоїдної системи і утворення кристалів CaCO_3 швидкість сорбції CO_2 досягає значень, що спостерігаються спочатку процесу.

Як у попередніх випадках, так і тут в момент прояву вищевказаних особливостей газ, що подається в апарат, є тільки засобом перемішування системи та не бере участі в процесі. Проте за рахунок підвищення опору в системі (при збільшенні в'язкості) його необхідно подавати більше, що призводить до значно меншого коефіцієнту утилізації корисного компонента з газу, підвищенню енерговитрат та не ефективному використанню робочого об'єму апарата.

У деяких системах при процесах сорбції в'язкість систем зростає настільки, що перетин апарату повністю заростає (забивається) тиксотропною фазою. При цьому припустимі витрати газу не можуть подолати опір шару та виникає аварійна ситуація. Такі ситуації описані в роботах [10, 13] при дослідженні процесу сорбції CO_2 розчином силікату натрію у виробництві білої сажі. Для ліквідації цього явища в апараті встановлюють засоби для механічного перемішування системи — мішалки, однак при цьому явище уповільнення або гальмування основних масообмінних і теплообмінних процесів не виключається.

Аналіз наведених робіт свідчить, що масообмінні процеси в розглянутих системах з хімічними перетвореннями або без них здійснюються за дифузійною кінетикою, в тому числі і процеси, пов'язані зі зміною структури систем (кристалізація, коагуляція і т. п.). Це означає, що швидкість процесів складається з ланцюга послідовних переміщень і перетворень речовини і визначається дифузиею (кондуктивною, турбулентною) і конвекцією у фазі, яка надає найбільший переважний опір переносу.

Розглянуті вище масообмінні технології характеризуються в основному легкорухливим середовищем — рідина — газ, тверді частки з'являються і впливають на завершальних стадіях. Також можна зробити висновок, що використовувані в технологічних процесах апарати мають низьку питому продуктивність, низькі коефіцієнти масовіддачі та характеризуються високою енергозатратністю для створення необхідної гідродинамічної обстановки. З викладеного вище логічно впливає завдання знаходження способів інтенсифікації процесів масо-переносу в даних системах та удосконалення конструкцій технологічних апаратів. Далі акцентуємо увагу на можливі шляхи вирішення даної задачі.

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єкт дослідження — гідродинамічні аспекти основних процесів міжфазного переносу, що протікають у апаратах різних конструкцій типових хімічних та харчових виробництв.

Мета дослідження — класифікувати та обґрунтувати вплив ефектів нестационарності та інерційності на міжфазовий перенос з метою формування передумов для створення більш інтенсивних масообмінних апаратів збільшеної продуктивності.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Провести літературний огляд джерел за темою, виділивши як класичні моделі та підходи до поставлених питань, так і експериментальні дані та їх показники, а також шляхи поєднання класичних та нових моделей та методів.

2. Провести огляд та класифікацію основних гідродинамічних факторів та складових переносу типових хімічних та харчових виробництв, їх «вузькі місця».

3. Знайти способи інтенсифікації процесів масопереносу в даних системах для удосконалення конструкцій технологічних апаратів.

4. Проблеми інтенсифікації масообмінних процесів та методи їх вирішення

Як вже зазначалося, процеси тепломасопереносу з хімічними реакціями (або без них) в легкорухомих гетерогенних системах визначається гідродинамічними факторами. Від останніх залежить інтенсивність конвективної та турбулентної складових перенесення на відміну від молекулярної дифузії. Тому основним показником інтенсивності є кількість масопереносу через міжфазну поверхню в системі. Нижче викладені основні підходи до кількісного визначення масопереносу через міжфазну поверхню [14, 15].

Модель Нернста для системи «легкорухоме середовище — тверде тіло». В основу моделі покладено: опір масопереносу зосереджено в тонкій плівці поточного середовища на кордоні з твердою межфазною поверхнею; в плівці відсутній рух; процес сталий в часі.

Потік речовини (щільність) визначається:

$$q_c = \frac{D}{\delta}(C_0 - C_S), \quad (1)$$

де, C_0 , C_S — відповідно початкова і поточна концентрації речовини; D — коефіцієнт дифузії; δ — товщина плівки.

Відношення $D/\delta = \beta$ є коефіцієнтом масовіддачі. Аналіз теорії показує, що найбільш тонка плівка і рівномірний розподіл C_0 в об'ємі середовища можуть бути тільки при високих числах Рейнольдса (Re), тобто при вираженому турбулентному режимі, коли вихори глибоко проникають в пристінну область і турбулентна дифузія D_T порівнянна з молекулярною.

Ленгмюр поширив теорію Нернста на випадок газорідної системи і запропонував систему рівнянь:

$$q_c = \beta_1(C_{10} - C_{1S}) = \beta_2(C_{2S} - C_{20}), \quad \frac{C_{1S}}{C_{2S}} = \Psi_{12}, \quad (2)$$

де індекс 1 — відповідає фазі-носію, 2 — дисперсній фазі, 1, 2 — на міжфазному кордоні.

Згідно цих моделей $\beta \approx D^a$, де $a = 1$.

Модель Хігбі. Базуючись на тому, що коефіцієнт β нелінійно пов'язаний з коефіцієнтом D у випадку двох

поточних середовищ, Хігбі висунув припущення, що ця нелінійність обумовлена нестационарністю масопереносу в системі «несуча фаза — частинка». Масоперенос до частинки здійснюється за допомогою плівки навколишнього середовища, яка контактує з часткою певний проміжок часу τ , після чого відбувається повна заміна плівки іншою плівкою. Таким чином здійснюється дискретне оновлення міжфазної поверхні. За таких умов зміна концентрацій описується рівнянням:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (3)$$

де x — координата. При початкових умовах $C(0, x) = C_0$, та граничних $C(\tau, 0) = C_S$, $C(\tau, \infty) = C_0$. Рішенням (3) буде:

$$q_c = \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot \tau}}(C_0 - C_S); \quad \langle q_c \rangle = 2\sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t}}(C_0 - C_S),$$

$$\beta = \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot \tau}}; \quad \langle \beta \rangle = 2\sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t}}, \quad (4)$$

де $t = d/U$, d — діаметр частинки; U — відносна швидкість частинки.

Модель Хігбі поклатала початок серії нестационарних (або пенетраційних) моделей масопереносу.

Найбільш відомі:

Модель Кишиневського: рівняння для β :

$$\langle \beta \rangle = 2\sqrt{\frac{D + D_T}{\pi \cdot t}}. \quad (5)$$

Тобто автор запропонував врахувати вплив турбулентності, додавши до D величину D_T .

Модель Данкверста: який обґрунтовано вважав, що оновлення поверхні здійснюється безперервно частинками, що мають рівний час перебування на міжфазній поверхні:

$$\langle \beta \rangle = \sqrt{DS}, \quad (6)$$

де $1/S$ — середньостатистичний час контакту сукупності частинок навколишнього середовища з поверхнею.

Як видно з рівнянь (2–6) показник ступеня приймається рівним 1. Однак, згідно дослідних даних, показник a істотно залежить від числа Прандтля — $Pr_D = V/D$.

Для газів $Pr_D \sim 1$, значення a порядку 0,5, для рідини $Pr_D \sim 100 \dots 3000$, значення a порядку 0,7–0,8. Таким чином, область значень $a \in [0,5; 1,0]$, ця область приводить до думки про спільний вплив нестационарних і «плівкових» факторів.

Модель Левича дозволяє вийти в зазначену область зміни показника в рамках стаціонарних уявлень про процес. Передбачається, що навколо твердої частинки або міхура існують два прикордонних шари: δ , в якому суттєво і лінійно змінюється концентрація C від C_S до C_0 ; δ_0 — динамічний прикордонний шар, в якому

суттєво і майже лінійно змінюється поздовжня швидкість U від 0 до U_0 . Отримано рівняння:

$$\left[\frac{\delta}{\delta_0} \right] \sim \frac{D}{V} = \frac{1}{\text{Pr}_A} \Rightarrow \frac{\delta_0}{\delta} \sim \text{Pr}_A^{\frac{1}{3}}, \beta \sim \frac{D^{\frac{2}{3}} V^{\frac{1}{3}}}{\delta_0} \Rightarrow \beta \sim D^{0,67}. \quad (7)$$

У разі турбулентного потоку по Левичу «плівки» складаються з чотирьох шарів: дифузійний підшар $D \approx D_T$ на кордоні; в'язкий підшар $D < D_T$; турбулентний прикордонний шар $D \ll D_T$; основний підшар з рівномірним розподілом концентрації. $C = C_0 \approx \text{const}$.

Для обчислення β отримано рівняння:

$$\beta = (\gamma Ni)^{0,25} \frac{D^{1-\frac{1}{m}} V^{\frac{1}{m}}}{\delta_0}, \quad (8)$$

де γ – динамічний коефіцієнт; m – ще досі предмет дискусій про фізичну суть, область значень $m \in [1;6]$;

Ni – число Нікурадзе, $Ni = \frac{v^* \delta_0}{V} \approx 11,5$; v^* – динамічна швидкість.

Модель міжфазної турбулентності Кафарова передбачає, що у разі взаємодії двох взаємо-нерозчинних поточних середовищ їх міжфазна поверхня деформується. За різної щільності середовищ їх спільне переміщення можливо тільки, якщо $U_1 \neq U_2$. Розрив швидкостей обумовлює нестійкість міжфазної поверхні. Виникають шари змішання, які турбулізують при дуже малих числах Re ($Re_{kp} \sim 50$). Вплив міжфазної турбулентності враховується за допомогою «фактора гідродинамічного стану двофазної системи» f в якості додаткового коефіцієнта, що входить до критеріального рівняння масовіддачі.

У загальному випадку для всіх моделей рівняння масовіддачі при перенесенні речовини з першої фази до другої:

$$M_{1,2} = \beta_k S_{1,2} \Delta C_k, \quad (9)$$

де $k=1,2$, та $\Delta C_k \begin{cases} C_{10} - C_{1S}, & k=1; \\ C_{2S} - C_{20}, & k=2, \end{cases}$ тут $S_{1,2}$ – міжфазна поверхня.

Аналіз рівняння (9) показує, що якщо задана рушійна сила переносу ΔC_k , то очевидний спосіб збільшення швидкості процесу полягає у збільшенні двох співмножників в правій частині рівняння (9).

Представлений вище аналіз, що отримали визнання моделей масопереносу, а також моделі ізотропної турбулентності Колмогорова, яка в даний час досить широко застосовується для аналізу трифазних систем [5–11] – однозначно свідчить про вплив аерогідродинамічної обстановки на значення β_k та однозначно необхідному підвищенні числа Re , або про зменшення «часу оновлення міжфазної поверхні» в пенетраційних моделях, що також досягається при зростанні числа Re .

Збільшення міжфазної поверхні $S_{1,2}$ не настільки безальтернативно, як збільшення β_k . Так зростання $S_{1,2}$ призводить до зменшення розміру дисперсії, ускладнює

поділ фаз і зменшує число Re , яке залежить від розміру часток (міхурів і т. п.). Крім того, при збільшенні $S_{1,2}$ зростає лапласовського складова тиску у частці, що перешкоджає масопереносу в ній. Гідродинамічна обстановка визначається конструкцією апарату.

Для проведення масообмінних процесів в трифазній системі в основному використовується три типи апаратів: апарати з фіксованою поверхнею міжфазного контакту (плівкові, розпилювальні колони); апарати з контактною поверхнею, яка утворюється при русі фаз (насадкові, тарілчасті колони); апарати з зовнішнім введенням енергії (роторні апарати, з мішалками, апарати зі статичними перемішувальними пристроями).

Апарати першого типу мають низьку питому продуктивність на одиницю об'єму апарату. В апаратах другого типу приблизно 50 % масопереносу здійснюється в період формування дисперсії (краплі, бульбашки). До такого висновку можна прийти на підставі моделі Хігбі. У цьому зв'язку створювати в апараті «довгоживучі» дисперсії не доцільно. Очевидно, слід здійснювати процес в режимі інверсії фаз, коли безперервно відбувається оновлення міжфазної поверхні і по черзі кожна з фаз стає то дисперсною, то дисперсійною. Ці положення підтверджуються для колонних апаратів в роботах Кафарова, в яких встановлено, що явища, які відбуваються в режимі інверсії фаз, забезпечують інтенсифікацію процесів на порядок та більше.

Стійкий і тривалий режим інверсії фаз можна організувати при введенні в апарат зовнішньої енергії та підтримки високих чисел Re , тому апарати третьої групи найбільш поширені, а крім того більшість апаратів другої групи мають пристрої для введення зовнішньої енергії. Проте і цим апаратам притаманні недоліки. Вони полягають у тому, що при високих значеннях Re введена в апарат енергія рівномірно розподіляється по об'єму апарату, в той час, як основний опір масопереносу зосереджено в околиці міжфазної поверхні, куди і необхідно вводити енергію. В результаті рівномірного розподілу інверсійний режим швидко згасає. У цьому зв'язку технологічний ККД апаратів малий, а витрати енергії на створення необхідних режимів істотно великі при різкому збільшенні гідравлічного опору апарату. Таким чином, створюється ситуація, коли зростання коефіцієнтів тепломасопередачі істотно відстає від зростання гідравлічного опору апарату, що призводить до значних енерговитрат при досягненні мети. Слід зазначити, що цей недолік властивий практично всім розглянутим категоріям апаратів, а також різній теплообмінній апаратурі.

З вищевикладеного випливає завдання знаходження способів перерозподілу енергії в просторі та часі та «доставка» її в задані області. Це завдання технічно може бути здійснено при організації нестационарного руху в апараті з проявом інерційності. Для досягнення необхідного ефекту нестационарний рух має бути коливальним, тобто реалізовуватися багаторазово. Неодноразово повторюваний розгінно-гальмівний рух середовища є рух періодичний, пульсаційний, що в загальному випадку характеризується зміною швидкості та вектора її напрямку, зміною тиску.

Одним з методів організації пульсаційної обробки гетерогенного середовища є використання пульсаційних пристроїв при проведенні тепло- масообмінних процесів в апаратах. Вперше пропозицію про використання

пульсаційних пристроїв при проведенні масообмінних процесів було зроблено Ван Дійком, далі проводилися спроби впровадження в промислову практику пульсаційного методу обробки. У лабораторних умовах отримано експериментальні результати, що свідчать про істотну інтенсифікації процесу масопередачі. У дослідно-промислових умовах автори не підтвердили ефекти, які спостерігаються при лабораторних дослідженнях, що пов'язано з обмеженістю технічних рішень при організації пульсаційних режимів. Результати мають яскраво виражений емпіричний характер, обмеженість технічних рішень не дозволяє створити на їх основі методику, яка встановлює ступінь доцільності застосування пульсаційних методів в кожному конкретному випадку. На основі теорії масопередачі і коливального руху гетерогенного середовища (рідина – тверді частинки, рідина – рідина, рідина – газ) показано, що організація пульсаційного процесу повинна бути більш ефективною, ніж стаціонарна. Виходячи з моделі локальної ізотропної турбулентності Колмогорова було отримано залежності:

$$\beta_{ТВ} \approx a_{ТВ} \varepsilon^{0,25}; \beta_{Ж} \approx a_{Ж} \varepsilon^{0,3}; \beta_{Г} \approx a_{Г}^{\gamma}, \quad (10)$$

де $a_{ТВ}$, $a_{Ж}$, $a_{Г}$ – розмір часток; ε – питома швидкість дисипації турбулентної енергії:

$$S_j \approx \frac{\sigma a_j V}{B_j} \left[\frac{\rho_j \varepsilon^{2/3}}{\sigma} \right]^{0,6} \approx b_{j1} \varepsilon^{0,4},$$

$$\Delta S_j \approx \frac{a_j V}{2} d_j^{2/3} \left[\frac{\rho_j \varepsilon^{2/3}}{\sigma} \right] \approx b_{j2} \varepsilon^{0,67}, \quad (11)$$

де V – об'єм апарату; d – діаметр частинок; σ – поверхневе напруження; a, b – числові коефіцієнти; γ – показник ступеня, $\gamma \in [0,2; 1,0]$.

На підставі аналізу цих залежностей встановлено, що безумовне збільшення масоперееносу при пульсаційній організації процесу виявиться, коли сума показників ступенів пари залежностей з (10 та 11) виявиться не менше одиниці. Автори вважають, що ці положення виконуються для систем, які не схильні до розшарування фаз. Наприклад, для системи «рідина – тверді частинки – газ» або «рідина – тверді частинки» вищевказані умови можуть бути іншими.

Для оцінки ефективності міжфазного тепломасоперееносу в пульсуючому потоці авторами отримані співвідношення:

$$\frac{\langle Nu \rangle}{Nu_0} = \frac{1}{\tau} \int Nu dt$$

$$\frac{\langle U_2 \rangle}{U_{20}} = \frac{1}{\tau} \int U_2 dt, \quad (12)$$

де

$$\text{при } Re/B_1 < 161,6 \quad Nu = 1,6 \cdot 10^{-2} \left(\frac{Re}{B_1} \right)^{1,33} Pr^{0,33};$$

$$\text{при } Re/B_1 \geq 161,6 \quad Nu = 0,4 \left(\frac{Re}{B_1} \right)^{0,667} Pr^{0,33};$$

$$Re = |U_1 - U_2| \cdot \frac{d_2}{V_1}, \quad Pr = \frac{V_1}{D_1}, \quad Nu = \frac{\beta d_2}{D_1};$$

U_{20} – швидкість дисперсної фази при відсутності зовнішніх гідродинамічних впливів; B_1 – параметр, $B_1 \in [0,7; 1,0]$; $\tau = 2\pi/\omega_1$, ω_1 – кутова швидкість; t – час.

Співвідношення (12) відображає зміну усередненого коефіцієнта масовіддачі при пульсаціях суміші в порівнянні з випадками чистого гравітаційного її осадження або спливання, а також характеризує збільшення часу перебування пульсуючої суміші в колонному апараті.

Ефект нестационарності та інерційності в гетерогенній системі можна досягти при русі закрученого потоку по криволінійних каналах, або каналам, та мають періодичне звуження розширення за типом «конфузор – дифузор». Привабливість даного методу полягає в тому, що відповідає необхідність вводити в апарат спеціальні пульсаційні пристрої (поршневого типу, газоімпульсних безпосередньої дії, та інші), а крім того цей метод дає ефект для всіх типів гетерогенних систем, у тому числі для систем «рідина – тверді частинки – газ». Таким чином, викладений метод більш універсальний, ніж метод з використанням пульсаційних пристроїв.

В роботі [16] показано, що конструкція апарату, що має послідовні періодичні звуження типу «конфузор – дифузор» для системи «газ – рідина» при значенні $Re = 3,56 \cdot 10^4$ дозволяє інтенсифікувати тепло- масообмін у 1,5 рази. Оцінка проводилася за значенням чисел Nu для апаратів з гладкими стінами, і апарату, що має звуження.

В роботі [17] проведено дослідження гідродинаміки та інтенсивності процесів тепло- масообміну в тороподібному газорідинному реакторі. Встановлено, що криволінійна конфігурація камери реактора дозволяє інтенсифікувати теплообмін. Показано, що коефіцієнт теплопередачі в тороподібному реакторі у 3–3,5 рази вище, ніж в прямокутному реакторі тієї ж довжини. При цьому, як показано в роботі [17], інтенсивність збільшення коефіцієнта теплопередачі у 1,2 рази випереджає темп зростання гідравлічного опору апарату, що свідчить про менші енергетичні витрати, що необхідні для досягнення ефекту. Аналогічні ефекти підтверджуються також закордонними дослідниками [16]. Змієвікова конфігурація апарату дозволяє інтенсифікувати теплообмін за рахунок виникнення вторинних течій, викликаних вигином камери, та за рахунок немонотонної зміни осьового дотичного напруження в потоці. Однак емпіричний характер цих робіт не дозволяє створити на їх основі методику розрахунку та створення конструкції апарату. Необхідно провести дослідження для отримання універсальних залежностей, що дозволяють розраховувати тепло- масообмін в апаратах та їх гідродинаміку.

5. Обговорення результатів дослідження впливу ефектів нестационарності та інерційності на міжфазове перенесення

У підсумках вищевказаного, згідно з аналізом, вплив ефектів нестационарності та інерційності на міжфазове перенесення призводить до:

- оновлення міжфазної поверхні, збільшення міжфазної турбулентності, що збільшує основні складові перенесення β та S ;
- попередженню проскока в апаратах частинок, що не прореагували (запобігання «тунельних» ефектів); перерозподілу і концентрації введеної енергії в просторі та часі;
- виводу трансформації енергії, що вводиться (теплової в механічну, кінетичної в потенціальну);
- підвищення продуктивності за рахунок формальної пульсаційної організації процесу.

Слід вважати перспективним досягнення ефекту нестационарності та інерційності в гетерогенних системах за рахунок комбінації закручування потоків та їх рухів по криволінійних каналах змінного перерізу. Дослідження в даному напрямку дозволяють створити інтенсивні масообмінні апарати, в яких можна досягти ситуації, коли темп зростання коефіцієнтів тепло- масопередачі буде випереджати темп зростання гідравлічного опору апаратів.

6. Висновки

У результаті проведених досліджень:

- Викладені основні підходи до кількісного визначення масопереносу через міжфазну поверхню.
- Визначено спосіб технічно здійснити перерозподіл енергії в просторі та часі й «доставку» її в задані області шляхом забезпечення нестационарного руху в апараті з проявом інерційності та організації пульсаційної обробки гетерогенного середовища.
- Сформульовано рекомендації щодо вдосконалення деяких типових конструкцій технологічних апаратів з метою збільшення їх продуктивності та більш якісного проведення процесів з меншими витратами.

Література

1. Мелихов, И. В. Наука о кристаллизации на пороге третьего тысячелетия [Текст] / И. В. Мелихов, А. М. Кутепов // Теоретические основы химической технологии. — 2001. — Т. 35, № 5. — С. 451–456.
2. Dinsmore, A. D. Self-assembly of colloidal crystals [Text] / A. D. Dinsmore, J. C. Crocker, A. G. Yodh // Current Opinion in Colloid & Interface Science. — 1998. — Vol. 3, № 1. — P. 5–11. doi:10.1016/S1359-0294(98)80035-6
3. Слинко, М. Г. Некоторые тенденции развития теории химической технологии [Текст] / М. Г. Слинко // Химическая промышленность. — 2000. — № 2(69). — С. 3–8.
4. Покусаев, Б. Г. Процессы переноса в многофазной среде [Текст] / Б. Г. Покусаев // Теоретические основы химической технологии. — 2007. — Т. 41, № 1. — С. 35–43.
5. Беляев, Э. К. Некоторые вопросы карбонизации аммиачно-соляного раствора [Текст] / Э. К. Беляев, В. М. Томенко // Вопросы химии и химической технологии. — Харьков: В.Ш., 1978. — Вып. 32. — С. 83–90.
6. Беляев, Э. К. Основные направления интенсификации процесса карбонизации в производстве очищенного бикарбоната натрия [Текст]: Тр. НИОХИМ / Э. К. Беляев // Технология соды и содопродуктов. — Харьков, 1980. — Т. 52. — С. 74–84.
7. Шаповров, В. П. Пути интенсификации процессов массопереноса в барботажных колоннах (БСК) противоточного типа с контактными элементами перекрестноточного типа [Текст] / В. П. Шаповров, В. М. Титов, О. А. Лопухина и др. // Вестник ХГПУ. — Харьков, 1999. — Вып. 33. — С. 3–19.
8. Шаповров, В. П. Влияние начального пересыщения на интегральные характеристики дисперсной фазы, осаждающейся в карбонизационной колонне содового производства [Текст] / В. П. Шаповров, В. М. Титов, Ю. А. Иванов // Вестник ХГПУ. — Харьков, 1999. — Вып. 28. — С. 49–56.

9. Шаповров, В. П. Моделирование процесса роста кристаллов из раствора кристаллизанта, образуемых взаимодействием солевых растворов с газообразным CO_2 [Текст] / В. П. Шаповров, О. А. Лопухина, Ю. А. Иванов // Вестник ХГПУ. — Харьков, 1998. — Вып. 25. — С. 97–103.
10. Иванов, Ю. А. Исследование кинетики кристаллизации твердой фазы из пересыщенного раствора [Текст]: Труды НИОХИМ / Ю. А. Иванов, В. П. Шаповров, С. В. Титов, А. Ф. Долкарт // Химия и технология производства основной химической промышленности. — Харьков, 1998. — Т. 61. — С. 82–84.
11. Иванов, Ю. А. К вопросу о влиянии поверхностно-активных веществ (ПАВ) на абсорбцию углекислоты и процесс кристаллизации NaHCO_3 в карбонизационной колонне (КЛ) содового производства [Текст] / Ю. А. Иванов, В. М. Титов, В. П. Шаповров // Вестник ХГПУ. — Харьков, 1999. — Вып. 66. — С. 11–17.
12. Лопухина, О. А. Сравнительный анализ типовых промышленных аппаратов для процесса сатурации в свеклосахарном производстве [Текст] / О. А. Лопухина, В. П. Шаповров // Интегрированные технологии и энергосбережение. — Харьков: НТУ ХПИ, 2002. — № 4. — С. 30–43.
13. Далматская, Е. И. Кинетика и статика карбонизации растворов силиката натрия [Текст]: Труды НИОХИМ / Е. И. Далматская // Работы по технологии производства наполнителя и адсорбентов минерального происхождения. — Харьков, 1963. — Т. XV. — С. 83–96.
14. Астарита, Д. Ж. Массопередача с химической реакцией [Текст] / Д. Ж. Астарита. — Л.: Химия, 1971. — 224 с.
15. Kawase, Y. Mathematical models for desing of bioreactors applications of Kolmogoroff's theory of isotropic turbulence [Text] / Y. Kawase, M. Moo-Young // Chemical Engineering Journal. — 1990. — № 5(43). — С. 19–41.
16. Ткач, Г. А. Перспективные пути интенсификации теплообменных процессов [Текст] / Г. А. Ткач, В. П. Шаповров, Д. В. Маслов // Экология химической техники и биотехнологии. — Харьков: ХГПУ, 1996. — Т. 1. — С. 96–98.
17. Шаповров, В. П. Экспериментальное исследование торондального реактора с закруткой потоков [Текст] / В. П. Шаповров, Г. А. Ткач, И. В. Хитрова, С. А. Минек // Вестник ХПИ. — 1989. — Вып. 2, № 269. — С. 37–41.

ВОПРОСЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОТЕКАНИИ РЕАКЦИЙ В СЛОЖНО-РЕАКЦИОННЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ

В данной работе на основании исследования теории процессов тепломассопереноса, известных моделей межфазной тепломассопередачи конкретизирована гидродинамическая сторона процессов переноса. Это позволяет обоснованно подойти к методам интенсификации межфазного переноса: механический, пульсационный, тепловой образования-захлопывания пузырьков, закручивания и движения среды по криволинейным каналам. Показано, что каждый метод может быть реализован в соответствующей конструкции аппарата, разработка и исследование этих конструкций является перспективным направлением.

Ключевые слова: массообменные процессы, интенсификация, гетерогенная система, межфазная поверхность, инверсия фаз.

Васильев Михайло Ілліч, кандидат технічних наук, доцент, кафедра хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, e-mail: mike_v@i.ua.

Васильев Михаил Ильич, кандидат технических наук, доцент, кафедра химической техники и промышленной экологии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина.

Vasyliiev Mykhailo, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: mike_v@i.ua