

ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВИХ ЯВИЩ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ МАСООБМІНУ В ГАЗОРІДИННИХ АПАРАТАХ З КРАПЛИННОЮ ТЕЧІЄЮ

**Марценюк О.С., д-р техн. наук, професор,
Національний університет харчових технологій, м. Київ.
Марценюк Л.С., канд. фіз.-мат. наук
Інститут ядерних досліджень АН України, м. Київ.**

Розглянуто вплив поверхневих явищ на циркуляцію рідини в краплях і зв'язану з нею інтенсивність масообміну в апаратах з краплинною течією. Показано, що найвища інтенсивність масообміну реалізується в умовах співпадання напрямку циркуляції рідини під впливом різних факторів, які впливають на поверхневу конвекцію.

Ключові слова: інтенсивність масообміну, капілярна стала, краплинна течія, поверхневий натяг, циркуляція в краплях.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ МАССООБМЕНА В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ АППАРАТАХ С КАПЕЛЬНЫМ ТЕЧЕНИЕМ

Марценюк А.С., Марценюк Л.С.

Рассмотрено влияние поверхностных явлений на циркуляцию жидкости в каплях и связанную с ней интенсивность массообмена в аппаратах с капельным течением. Показано, что наибольшая интенсивность массообмена реализуется в условиях совпадения направления циркуляции жидкости под влиянием разных факторов, которые влияют на поверхностную конвекцию.

Ключевые слова: интенсивность массообмена, капиллярная постоянная, капельное течение, поверхностное натяжение, циркуляция в каплях.

INFLUENCE OF SURFACE PHENOMENA ON INTENSITY OF MASS TRANSFER IN GAS-LIQUID APPARATUSES WITH DROP FLOW

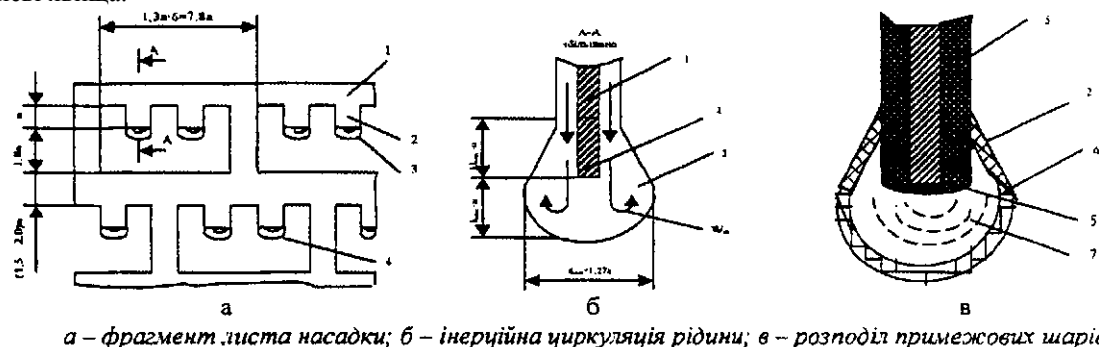
Martsenyuk A., Martsenyuk L.

The author has researched the influence of surface phenomena on liquid circulation in drops and intensity of mass transfer related thereto in apparatuses with drop flow. This article shows that the greatest intensity of mass transfer is realized under the conditions of coinciding of direction of liquid circulation due to various factors, which influence surface convection.

Key words: intensity of mass transfer, capillary constant, drop flow, surface tension, circulation in drops.

В умовах невинного зростання вартості енергоносіїв питання підвищення ефективності масообміну в газорідинних апаратах за мінімального зростання гідравлічного опору набуває все більшої актуальності. До перспективних можна віднести колонні апарати з регулярними насадками, в яких реалізується утворення крапель на зубцях верхніх країв отворів (режим краплинної течії) [5-8,10].

Недостатня обізнаність про особливості механізму впливу поверхневих явищ на масообмін під час краплинної течії стримує розширене застосування апаратів з регулярними насадками, в яких реалізується краплинно-плівкова течія, і розроблення ефективних контактних пристроїв, у яких використовуються поверхневі явища.



а – фрагмент листа насадки; б – інерційна циркуляція рідини; в – розподіл прилежових шарів

Рис. 1 – Краплинна течія рідини по насадці з зубчастими отворами

На рис. 1,а показано фрагмент листа насадки [5]. Для зручності монтажу і обслуговування листи скріплюють в пакети, які встановлюють на утримуючих решітках. В листах 1 насадки виконані (у металевих листах виштамповані) видовжені в горизонтальному напрямку отвори 4 з зубчастими верхніми краями. Насадка працює в умовах протитечійної взаємодії потоків при гравітаційному стіканні рідини. При подачі зрошення з помірними витратами стікаюча вниз плівка рідини на зубцях 2 формується в краплі 3. При великих щільностях зрошення частота утворення і відривання крапель зростає, краплинна течія змінюється на стуминну і ефективність масообміну в колонах з такою насадкою знижується.

Режим краплинної течії реалізується в межах чисел Рейнольда для рідини

$$20 \leq Re_x \leq 400, \quad (1)$$

де $Re_x = 4\Gamma / \mu$ - критерій Рейнольдса для рідкої фази;

Γ – лінійна щільність зрошення, кг/(м·с);

μ - коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, Па·с.

Дослідження [7,8] показують, що ефективність масообміну в апаратах з краплинною течією за показником висоти еквівалентної одиниці переносу маси на 30...50 % вища, ніж в апаратах з плоскопаралельною насадкою, виготовленою з неперфорованих листів, на поверхні яких реалізується виключно плівкова течія рідини. Завдяки краплинній течії ефективність насадок з зубчастими отворами зростає незважаючи на те, що загальна змочувана поверхня перфорованих листів зменшується на величину поверхні виштампованих зубчастих отворів.

Оскільки всі технологічні процеси відбуваються в нерівноважних умовах, то й краплі завжди знаходяться в незрівноваженому стані – вони безперервно нагріваються, охолоджуються, випаровуються, ростуть, деформуються і ніколи не бувають у нерухомому (незмінному) стані.

Особливістю краплинної течії є те, що від стрижня (зубця, піпетки) відривається і падає у вигляді краплі не вся рідина, а приблизно дві третини від маси завислої рідини. Кількість рідини, що лишається завислою на нижньому краї стрижня, дещо змінюється і залежить від розмірів і форми стрижня. Під час поповнення залишку рідини на стрижні зі стікаючим потоком надходить певна кількість руху, яка внаслідок інерції створює циркуляцію всередині завислої частини рідини – рис. 1,б – з максимальними швидкостями циркуляційних рухів $w_{ин}$, які не можуть перевищувати середньої швидкості стікання плівки (яка стікає в ламінарному режимі). Утворені циркуляційні контури хоч і слабкі, але впливають на розподіл пограничних шарів. До твердої поверхні зубця прилягає стійкий нерухомий пограншар 5 – рис. 1,в – на межі з газовою фазою створюється менш стійкий і більш рухливий пограншар 6, а в середній частині рідини 7 відбувається слабка ламінарна циркуляція.

В умовах протитечії газовий потік, що рухається вгору і обтікає краплю, створює дотичну напругу на її поверхні і змушує рухатись приповерхневі шари рідини з деякою швидкістю w_τ – рис. 2,а. Співпадання напрямів швидкостей $w_{ин}$ і w_τ підвищує інтенсивність конвективних течій.

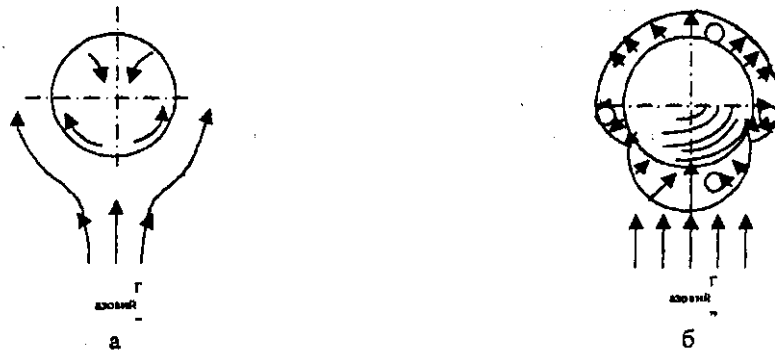


Рис. 2 – Утворення догічних напружень (а); розподіл тисків на поверхні краплі внаслідок обтікання її газовим потоком (б)

Обтікаючи сферичне тіло газовий потік створює додатковий тиск у його лобовій частині і від'ємний (знижений) тиск у кормовій частині (порівняно з атмосферним і статичним тиском всередині рідини). Розподіл нормальних (перпендикулярних до поверхні) тисків при обтіканні сферичного тіла [2] показаний на рис. 2,б.

Фронтальні сили сплющують краплю, а бокові – розтягують, намагаючись деформувати її в увігнутий диск. Внаслідок різних сил, прикладених до різних точок поверхні, всередині краплі виникають внутрішні течії, спрямовані від більших до менших тисків.

Турбулентні пульсації газового потоку сприяють осциляції крапель і посилюють гідродинамічну нестійкість її поверхні. Основною причиною осциляції крапель є імпульс, який створюється внаслідок відривання крапель від зубців.

Перед відриванням рідина під зубцем потовщується. Досягнувши певного розміру потовщення видовжується, на ньому з'являється перетинка (шийка) – з'єднуюча ланка між частиною рідини, що відривається і частиною, яка силою поверхневого натягу утримується від падіння. По мірі збільшення провисання краплі перетинка стає тоншою, на ній утворюються, як правило, два звуження, в яких вона згодом розривається. Верхня частина рідини підтягується до зубця, залишок перетинки між двома розривами скорочується і приймає форму маленької крапельки (крапля Плато), а нижня частина рідини падає у вигляді краплі. Краплю Плато, об'єм якої на 2... 3 порядки менший від об'єму великої краплі, ми звичайно не помічаємо.

Кінці перетинок після розривання під дією сил поверхневого натягу імпульсно втягуються всередину залишку рідини на зубці і всередину краплі, створюючи їх коливання (осциляцію). Осциляції залишку рідини на зубцях мають більшу частоту і затухають швидше, ніж осциляції падаючої краплі.

Осциляції можна розглядати як коливання, що поширюються на весь об'єм крапель і існують одночасно з поверхневими і циркуляційними течіями значно нижчих швидкостей і частот. Порівнюючи краплинну і плівкову течії рідини осциляцію можна вважати більш інтенсивним аналогом хвиль, що утворюються при гравітаційній течії.

Період коливання крапель $\tau_{осц}$ під час осциляції знайдено методом аналізу розмірностей, прийнявши, що $\tau_{осц}$ залежить від в'язкості рідини μ , поверхневого натягу σ і радіуса R крапель, $\tau_{осц} \sim R\mu/\sigma$. Оскільки хвиля коливань всередині краплі повинна пройти відстань $2R$ до протилежного боку, а потім повернутись, то повний період одного коливання оцінюється часом

$$\tau_{осц} \approx 4R\mu/\sigma \quad (2)$$

Порядок швидкості поширення хвиль деформації при осциляції крапель знаходимо за формулою

$$W_{осц} \approx \frac{4R}{\tau_{осц}} \approx \frac{\sigma}{\mu} \approx \frac{73 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} \approx 73 \text{ м/с}, \quad (3)$$

що приблизно відповідає експериментальним даним, отриманим за допомогою фотографування осцилюючих крапель у початковий період падіння.

При краплинній течії повніше, ніж при плівковій, реалізуються ефекти, що виникають у поверхневих шарах рідини внаслідок локальних змін поверхневого натягу (ефекти Марангоні).

З енергетичної точки зору коефіцієнт поверхневого натягу – це робота A , яку необхідно забрати в ізотермічних умовах для збільшення площі поверхні рідини F на одиницю при збереженні незмінним об'єму рідини. Розмірність поверхневого натягу σ можна представити як

$$\sigma = A/F = [\text{Дж/м}^2] \quad (4)$$

і як

$$\sigma = [\text{Дж/м}^2] = [\text{Н} \cdot \text{м/м}^2] = [\text{Н/м}] = P/l, \quad (5)$$

тобто поверхневий натяг можна трактувати також як силу P , спрямовану тангенціально до поверхні і віднесену до одиниці довжини l периметра цієї поверхні. Обидва визначення рівнозначні і можуть бути використані для аналізу поверхневих явищ.

Незважаючи на молекулярну природу поверхневого натягу і малий радіус сфери молекулярної взаємодії (порядка 10^{-9} м), сили поверхневого натягу можуть діяти на значно більших відстанях. Для з'ясування сфери дії поверхневих сил у газорідинній системі з визначальною гравітаційною силою розглянемо рівновагу між поверхневою і об'ємною складовими вільної енергії рідини. Для замкнутого об'єму рідини з лінійним розміром a і коефіцієнтом поверхневого натягу σ маємо поверхневу складову $P_{\text{пов}} = a\sigma$ і об'ємну складову $P_{\text{об}} = mg = \frac{\pi a^3}{6} \Delta \rho g \approx \frac{a^3 \Delta \rho g}{2}$, де $\Delta \rho$ - різниця густин рідини і газу, g - прискорення вільного падіння. Прирівнявши обидві складові $\frac{a^3 \Delta \rho g}{2} \approx a\sigma$, отримуємо

$$a \approx \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma}{\Delta \rho g}}, \quad (6)$$

де a – визначальний лінійний розмір системи, який називають капілярною сталою або константою Лапласа.

Для системи вода – повітря за нормальних умов $a \approx 3,8$ мм, тобто поверхневі сили зрівноважують визвану тяжінням об'ємну силу при визначальних розмірах рідкої фази (крапель, бризок, плівок, газових бульбашок) близьких до 3,8 мм. Це означає, що коли у газорідинній системі хоч якийсь лінійний розмір менший за 3,8 мм, то поверхневі сили відіграють у ній суттєву роль. Як приклад можна привести барботажні системи, в тому числі на тарілках перегонних колон, або системи в протитечійних насадкових скруберах, де товщина плівок рідини не перевищує розміру капілярної сталої. Від взаємодії поверхневих сил з іншими силами залежить як інтенсивність циркуляції рідини і зв'язана з нею інтенсивність масообміну всередині крапель, так і розмір крапель, що формуються на зубцях насадки.

У праці [9] на основі розгляду балансу сил поверхневого натягу і гравітації встановлено теоретично і підтверджено дослідними даними, що діаметр у горизонтальній площині крапель, які утворюються на кінці циліндричної піпетки (стрижня, зубця насадки), обумовлюється величиною капілярної сталої і приймає максимальне значення $d_{\text{макс}}$ при куті змочування $\theta = 145^\circ$

$$d_{\text{макс}} \approx 1,27 \approx 1,27 \sqrt{\frac{2 \sigma}{\Delta \rho g}} \quad (7)$$

Краплі максимального розміру відриваються від піпеток, діаметр яких перевищує капілярну сталу. Від зубців перфорованих насадок відриваються краплі не максимального, а дещо меншого діаметра, але такі, що відносяться до розряду великих.

Краплі на великі і малі поділяють за співвідношенням між діючими всередині крапель об'ємними і поверхневими силами. Великими вважають краплі, для яких об'ємні і поверхневі сили сумірні, а малими – такі, для яких поверхневі сили на порядок і більше перевищують об'ємні сили. Оцінимо розміри таких крапель.

Лапласівський тиск, спричинений силою поверхневого натягу, для сферичних крапель радіусом R дорівнює $P_{\text{л}} = 2\sigma/R$. Сила тяжіння (об'ємна сила), що діє на краплю $P = mg = \frac{4}{3}\pi R^3 \Delta \rho g$. Щоб отримати величину тиску, викликаного цією силою, віднесемо її до площі, рівної за порядком квадрату радіуса краплі R^2 . Тоді тиск, викликаний силою тяжіння, буде $P = \frac{4}{3}\pi R \Delta \rho g$. Прирівнявши сили $P_{\text{л}}$ і P_g і скоротивши близькі величини 3 і π , отримаємо радіус великих крапель

$$R \approx \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\sigma}{\Delta \rho g}} \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\sigma}{\Delta \rho g}} \approx \frac{1}{2} a, \quad (8)$$

тобто великі краплі мають діаметр, сумірний з капілярною сталою.

Малі краплі мають діаметр на порядок менший від величини капілярної сталої. Краплі проміжного розміру залежно від параметрів системи і діючих сил можуть переходити як у розряд великих, так і у розряд малих.

Внаслідок підвищеного лапласівського тиску малі краплі (на відміну від великих) важче деформуються, не осцилюють і приймають сферичну форму незалежно від того, знаходяться вони у вільному падінні, чи лежать на незмочуваній поверхні, рухи поверхневих шарів і інерційні рухи всередині їх швидко гальмуються, перенесення маси відбувається переважно за механізмом молекулярної дифузії. У великих краплях під дією поверхневих та інших сил утворюються конвективні течії, зокрема реалізуються явища, названі ефектами Марангоні і пов'язані з гідродинамічною нестійкістю поверхні рідини під впливом локальних змін поверхневого натягу.

Розрізняють [4] два механізми інтенсифікації масообміну внаслідок гідродинамічної нестійкості міжфазної поверхні: перший – зв'язаний зі збільшенням повздовжньої складової поверхневої швидкості рідини; другий – зв'язаний з розвитком на поверхні рідини великої кількості комірок дрібномасштабної конвекції. Під час краплинно-плівкової течії реалізується переважно перший механізм, оскільки для розвитку дрібномасштабних циркуляційних комірок потрібна певна тривалість (не менше десяти секунд) дії фактора, що приводить до монотонної зміни поверхневого натягу і певна площа (не менше кількох квадратних сантиметрів) міжфазної поверхні.

Причинами змін поверхневого натягу і утворення поверхневих течій [1,2,3,4] можуть бути викликані хімічними реакціями, тепло- і масообміном локальні зміни концентрацій, температур, тисків, радіусів кривизни поверхні, густин речовини в об'ємі і на поверхні та інші фактори, які взаємодіючи і накладаючись можуть суттєво впливати на процеси перенесення.

На рис. 3, а подана схема утворення циркуляції рідини всередині краплі під впливом від'ємного градієнта поверхневого натягу, що утворився внаслідок зміни концентрації у процесі масообміну. У показаному випадку на краплю набігає потік з підвищеним вмістом легколеткого компонентна, що знижує поверхневий натяг рідини. Масообмін інтенсивніше проходить в зоні фронтальної взаємодії потоків, тому в районі ділянки $a\delta$ поверхневий натяг знижується швидше. Поверхнева плівка рухається в напрямку $d\sigma/dc$ і тиск під ділянкою $a\delta$ зменшується: у цю зону активніше надходить рідина з більш глибоких шарів краплі і викривлює її поверхню. При малих значеннях $\text{grad } d\sigma/dc$ внаслідок рухів поверхневого шару утворюються капілярні хвилі та додаткова циркуляція рідини, при тривалій дії виникають циркуляційні комірки. У разі великих миттєвих значень $\text{grad } d\sigma/dc$ можуть спостерігатись різкі викривлення поверхні і навіть викидання рідини з краплі, що означає створення міжфазної турбулентності. На рис. 3,б подано варіант, коли компонент, що надходить до нижньої ділянки поверхні, збільшує поверхневий натяг. У цьому випадку напрям руху поверхневих течій змінюється, рух рідини в зоні $a\delta$ спрямовується в глибину краплі і міжфазна поверхня в цій зоні залишається досить стабільною.

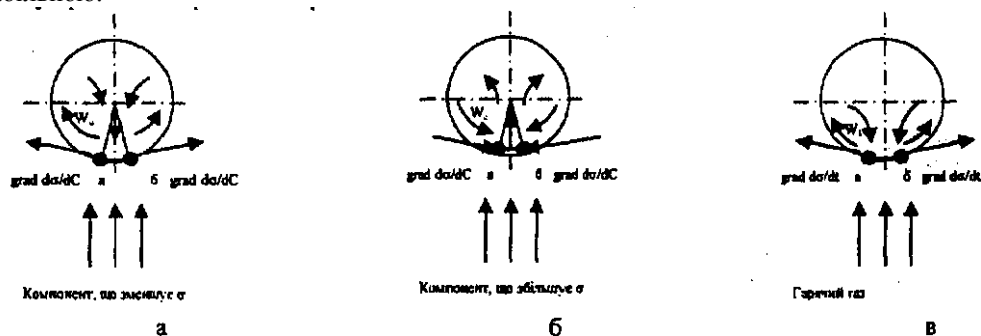


Рис. 3 – Утворення поверхневої конвекції під впливом градієнтів концентрації (а, б) і температури (в)

Поверхнева конвекція, що утворюється внаслідок зміни концентрації, впливає на інтенсивність сорбції і ректифікації. Ефективність ректифікації бінарних сумішей залежить від величини і напрямку зміни $\text{grad } d\sigma/dc$. За цією характеристикою суміші поділяють на три групи: позитивні, у яких поверхневий натяг зменшується зі зростанням концентрації легкого компонента ($d\sigma/dc < 0$), негативні, у яких $d\sigma/dc > 0$, і нейтральні, у яких $d\sigma/dc \approx 0$. Залежно від знака $\text{grad } d\sigma/dc$ змінюються гідродинамічні обставини процесу. Наприклад, при ректифікації суміші етанол-вода поверхневий натяг на верхніх тарілках зменшується (позитивна суміш), внаслідок чого оновлення поверхні контакту фаз посилюється і ефективність роботи тарілок зростає. За даними деяких дослідників вплив $\text{grad } d\sigma/dc$ на типову позитивну суміш етанол-вода сприяє підвищенню ефективності масообміну в ній до двох разів, порівняно з нейтральними сумішами.

Автори [3] поляризаційно-оптичним методом візуалізували конвективні приповерхневі структури, що утворювались внаслідок локальних змін поверхневого натягу під час хемосорбції CO_2 водними розчинами моноетаноламіну у кюветі глибиною 1...3мм. Зафіксовано, що через 50...60с після початку хемосорбції утворювались округлі циркуляційні комірки (дисипативні конвективні структури) розміром 0,5...2,0мм, які зникали через 10...12хв. внаслідок закінчення процесу хімічної сорбції. Очевидно, аналогічні комірки здатні розвиватись і у великих краплях (діаметром більше 1,5...2,0мм), але не можуть утворюватись (внаслідок швидкого затухання) у малих краплях (розміром менше 0,5мм).

На рис. 3,в подано схему утворення циркуляції рідини під впливом градієнта поверхневого натягу, створеного надходженням теплоти [11]. З підвищенням температури в зоні $a\delta$ поверхневий натяг зменшується і відбуваються явища, аналогічні до описаних стосовно рис. 3,а. Вказані умови реалізуються в градирнях і в ректифікаційних колонах, де температура в нижній частині колон завжди нижча, ніж у верхній. Автори робіт [4,11] відмічають, що при поглинанні теплоти поверхня стає нестабільною і може з'являтися міжфазна турбулентність, а виділення теплоти на плоскій межі поділу фаз приводить до стабілізації поверхні.

Апарати з краплинною течією матимуть найбільшу ефективність масовіддачі у рідкій фазі за умови, коли циркуляційні течії рідини в краплях, показані на рис.1, б, 2, а, 3, а і 3, в співпадають і забезпечать не тільки інтенсивне оновлення міжфазної поверхні, а й інтенсивне перемішування всередині крапель.

Висновки. Поверхневий натяг є фізичним параметром, який характеризує не окрему рідку фазу, а динамічну здатність міжфазної поверхні до здійснення процесів міжфазного обміну і суттєво впливає на процеси перенесення в газорідних системах, у яких обумовлюючий лінійний розмір близький до величини капілярної сталої або менший за неї. Найвища інтенсивність масообміну в апаратах з краплинною течією реалізується в умовах протитечійної гравітаційної течії рідини, коли поверхневий натяг рідкої фази, викликаний концентраційними і тепловими ефектами, зменшується від нижньої до верхньої частини колон.

Література

1. Аксельрод Ю.В., Дильман В.В., Фурмер Ю.В.. Межфазная турбулентность в вертикально стекающей пленке жидкости при хемосорбции // Теорет. основы хим. технологии. -1971. – т.5, №5. – С. 676-689.
2. Волынский М.С. Необыкновенная жизнь обыкновенной капли. – М.: Знание, 1986. – 144 с.
3. Воробьев А.В., Дильман В.В., Олевский В.М. и др. Визуализация диссипативных структур в условиях хемосорбции // Теорет. основы хим. технологии.- 1986, т. XX, №6. – С. 766 – 773.
4. Дильман В.В., Найденов В.И. О межфазной неустойчивости и влиянии градиента поверхностного натяжения на скорость хемосорбции при гравитационном течении жидкой пленки / Теорет. основы хим. технологии. – 1986, т. XX, №3. – С 316-326.
5. Деклараційний патент України на корисну модель 11// 669, МПК ВО27 19/32. Регулярна насадка з зубчастими отворами / Марценюк О.С. – Опубл. 16.01.2006р., Бюл. №1.
6. Марценюк О.С. Режими краплинно-плівкової течії рідини по регулярній насадці із зубчастими отворами // Наук. праці Українського держ. університету харч. технологій. – К.: УДУХТ. – 1998, №4, ч.2. – С. 36-38.
7. Марценюк О.С. Гідравлічні опори і масообмін у рідкій фазі в апаратах з регулярними насадками, перфорованими зубчастими отворами / Харч. пром-ть. Міжвід. темат. наук. зб. – К.: УДУХТ. – 2000. Вип. 45, С. 211-217.
8. Марценюк О.С. Науково-технічні основи інтенсифікації масообміну в газорідних апаратах з регулярними насадками Автореф. дис... д-ра техн. наук. – К.: НУХТ. – 2006. – 45 С.
9. Марценюк О.С., Дубінін О.О., Тахістова Г.О. Капілярні співвідношення для елементів контактних пристроїв масообмінних апаратів / Харч. \ пром-сть. – К.: НУХТ. – 2004. №3 – С112-118.
10. Марценюк О.С., Мельник Л.М., Копиленко А.В. Масообмін у газовій фазі в апаратах з регулярними насадками, що перфоровані зубчастими отворами / Наук. праці Нац. університету харч. технологій. К.:НУХТ. – 2002, №12 – С. 67-70.
11. Френцель Г., Линде Х. Линейный анализ неустойчивости Марангони в двухфазной системе с источником или стоком тепла на межфазной границе / Теорет. основы хим. технологии. – т. 20, 1986, №1, С. 28-36.

«Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій», Вип. 32, Одеса:ОНАХТ. – 2008, С. 78-84.