

**УДК 66.069.833 : 532.62**

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ МАСООБМІНУ  
В ГАЗОРІДИННИХ АПАРАТАХ З РЕГУЛЯРНИМИ НАСАДКАМИ**

**МАРЦЕНЮК ОЛЕКСАНДР СТЕПАНОВИЧ**

Кандидат технічних наук

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Анотація**

**Марценюк Олександр Степанович. Науково-технічні основи інтенсифікації масообміну в газорідинних апаратах з регулярними насадками. Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси й обладнання харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв. Національний університет харчових технологій, Київ. – 2005.

Дисертацію присвячено інтенсифікації масообміну, розробленню та експериментальному дослідженню перфорованих зубчастими отворами нових видів регулярних насадок на основі аналізу роботи масообмінних протитечійних насадкових колон і коливально-хвильових та поверхневих явищ у газорідинних системах.

Розглянуто закономірності руху неперервних і динамічних хвиль та взаємодії їх, проаналізовано ефекти в стисливих двофазних потоках під час проходження динамічних хвиль. Виведено капілярні співвідношення і встановлено визначальний лінійний розмір, що дорівнює капілярній сталій, для конструювання регулярних насадок із зубчастими отворами.

Наведено результати експериментальних досліджень гідродинамічних і масообмінних характеристик запропонованих насадок трьох типових

різновидів, проаналізовано особливості їх застосування та розроблено методику конструювання.

**Ключові слова:** газорідина система, гідродинаміка, динамічні хвилі, капілярна стала, коливально-хвильові явища, конструювання, масообмін, неперервні хвилі, поверхневі явища, регулярна насадка із зубчастими отворами.

### Аннотація

**Марценюк Александр Степанович. Научно-технические основы интенсификации массообмена в газожидкостных аппаратах с регулярными насадками. Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. Национальный университет пищевых технологий, Киев. – 2005.

На основе научно-технического анализа работы массообменных противоточных насадочных колонн, колебательно-волновых и поверхностных явлений в газожидкостных системах и экспериментальных исследований автора рассмотрены вопросы разработки перфорированных зубчатыми отверстиями регулярных насадок.

Рассмотрены закономерности движения непрерывных и динамических (звуковых) волн и взаимодействия их, проанализированы эффекты в сжимаемых двухфазных потоках во время прохождения динамических волн. Выведены капиллярные соотношения и установлен определяющий линейный размер, который равен капиллярной постоянной, для конструирования регулярных насадок с зубчатыми отверстиями.

Представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамических и массообменных характеристик разработанных насадок трех типичных разновидностей, проанализированы особенности их применения и разработана методика конструирования.

**Ключевые слова:** газожидкостная система, гидродинамика, динамические волны, капиллярная постоянная, колебательно-волновые явления, конструирование, массообмен, непрерывные волны, поверхностные явления, регулярная насадка с зубчатыми отверстиями.

### Annotation

**Martsenyuk A. S. Scientific-technical foundations of mass transfer intensification in gas-liquid apparatuses with regular packings.–A manuscript.**

Dissertation for the doctor of technical sciences degree in speciality 05.18.12 –Processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical productions.– National University of Food Technologies, Kyiv– 2005.

The thesis concerns developing the perforated regular packings with toothed holes. This development is made on the basis of theoretical analysis for oscillation-waves and surface phenomena in gas-liquid systems and for experimental research of mass-transfer countercurrent packing columns' work.

The author has analyzed the regularities of continuous and dynamic waves movement on the basis of one dimensional homogeneous flow model by G. Wallis and also has made calculation on the fluctuation of homogeneous gas-liquid flow parameters (speed, density, pressure, temperature) as the result of retard shock.

The author has also shown reasonableness of using artificially generated dynamic waves and retard shock with the purpose of intensification of mass-transfer processes in gas-liquid systems of technological apparatuses.

It is shown that the power of surface tension provides the connection between physicochemical, hydrodynamic and heat and mass transfer processes on interphase surface, influences the effectiveness of mass transfer sufficiently and should be taken into account while analyzing processes in gas-liquid systems with developed surface, including apparatuses with regular packings.

Continuous and dynamic waves and Marangoni-effects, resulting from local mass-transfer non-stationeries, change hydrodynamic conditions and mass-transfer intensity and therefore modeling of mass-transfer processes on hydrodynamic stand is approximate.

New regular packings with toothed holes have been elaborated. Hydrodynamic and mass-transfer characteristics of three typical varieties of developed packing whereas drop-film liquid flow is realized are researched experimentally.

There is also a classification and established limits on existence of the following regimes of drops' creation while liquid flowing out a dropper: balanced, free, resonant, chain, jet, spraying. For onephase liquid flow in examined packings the existence and limits on realization earlier non-described regimes of drop-film flow are established: with initiated drop flow, with initiated drop flow and areas of chain flow; separate little streams, wide streams.

The characteristic of initiated drop flow is that drops are tearing from the teeth under the influence of impulse of those drops which have fallen from

above and as the result periodically it creates stages of drops which are running down by S-turns in the direction of diagonally placed teeth.

When denseness of spraying grows it is accompanied by the superposing of chain flow parts on initiated drop flow and by subsequent transition of separate streams into the flow. Therefore drops are running spontaneously by S-turns and chains between vertical integral sprays which have breadth 9...18 mm.

Wide streams are running down in the form of rather strong currents and through the holes they integrate films from the both sides of sheet in a unit. The liquid is distributed more uniformly under the conditions of first two regimes.

Under conditions of drop-film flow countercurrent gas jet interacts with liquid more intense than under circumstances of film liquid. There is a classification on intensities of phase interaction: slight, appreciable, intense, strong. In the zones of intense and strong phase interaction the existence of new regimes of drop-film flow has been established: with uniform, irregular and unstable flow of drops.

The regime of uniform flow ( the most favorable for mass-transfer ) is realized under relative velocity of air 4-6 m/sec, when the mass of drops, which are hanging up, grows and intensive oscillation generates periodic fluctuations of capillary raising of the liquid with exceeding the height of teeth, that causes partial overflow of liquid on adjacent teeth and thus drops are tearing down with rather constant periodicity.

Irregular flow takes place at heightened denseness of spraying and at air velocity more than 4 m/sec. This regime is characterized by the chaotic creating and vanishing of separate streams in miscellaneous places on the surface of packing while oversized drops are running in a flow. Unstable flow takes place at air velocity higher than 6 m/sec and can be seen when drops are hanging up and pulsing more strongly and are falling incidentally in the non-vertical manner. This signals that the regime of emulsification is approaching.

It has been established that a packing with toothed holes without any subsidiary constructive elements is the most perfect from the viewpoint of using gas flow energy to intensify mass transfer and perhaps replace plane-parallel packing.

A packing with toothed holes and corrugates has higher hydraulic resistance and can be recommended for processes with prevailing resistance of mass transfer on gas phase and for apparatuses with unstable spray.

A packing with toothed petals cannot be used in the apparatuses with low pressure difference but can substitute irregular packings providing herewith rather lower hydraulic resistance and bigger pass capacity.

By solving the balance equations of volume and surface powers the defining geometrical size for calculation of constructive packing elements has

been established and this size equates to capillary constant. The peculiarities of constructing the examined packing varieties have been researched.

Key words: gas-liquid system, dynamic waves, capillary constant, oscillation-wave phenomenas, drop-film flow, mass transfer, continuous waves, surface phenomenas, regular packing with toothed holes.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Оздоровлення економіки України і перехід до ринкових відносин передбачають найшвидше розв'язання продовольчої проблеми на основі раціонального використання сировини та активних методів застосування науково-технічних досягнень, які забезпечують підвищення якості продукції при економному витрачанні паливно-енергетичних ресурсів. Щоб вирішити завдання, поставлені перед харчовою промисловістю України, потрібно на базі глибоких наукових досліджень розробити основи обґрунтованого конструювання і створити високоефективне технологічне обладнання, яке включає і газорідинні масообмінні апарати з регулярною насадкою.

Регулярні насадки за сукупністю основних робочих характеристик – низький гідравлічний опір, висока пропускна спроможність за газовою і рідкою фазами та висока інтенсивність масообміну на одиницю об'єму – значно переважають контактні пристрої інших типів. Але широке застосування їх стримується недостатньою ефективністю масообміну за показником висоти, еквівалентної одиниці перенесення (ВОП) маси.

На розроблення регулярних насадок з високою ефективністю масообміну (за показником ВОП) за умови збереження низького гідравлічного опору і спрямована ця робота.

Складність вирішення зазначеної проблеми полягає в тому, що згідно з принципом гідродинамічної аналогії підвищення ефективності масообміну вимагає забезпечення тіснішого контактування фаз і неодмінно супроводжується зростанням гідравлічного опору. Тому пошук оптимальних конструктивних рішень потребує не тільки узагальнення відомих положень, а й проведення нових теоретичних досліджень та експериментальних перевірок.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано у рамках Національної програми виробництва технологічних комплексів, машин та обладнання сільського господарства, харчової та переробної промисловості, затвердженої Постановою Кабінету Міністрів України за № 536 від 18 вересня 1992 року, відповідно до планів науково-дослідних робіт НУХТ, а також плану науково-дослідної роботи кафедри процесів і апаратів харчових виробництв та технології консервування НУХТ за напрямом “Розробка наукових основ тепломасообмінних процесів харчових виробництв з метою створення нового високоефективного обладнання, засобів механізації та комплексної автоматизації для харчових і переробних галузей АПК.”

Автором особисто проаналізовано літературні джерела і визначено перспективні напрямки досліджень, заплановано і проведено експерименти, оброблено і узагальнено їх результати.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є інтенсифікація масообміну в газорідних апаратах з регулярними насадками, які мають низький гідравлічний опір, на основі комплексних теоретичних і експериментальних досліджень гідродинамічних і масообмінних процесів у газорідних системах та визначення перспективних напрямків підвищення їх ефективності. Щоб досягти поставленої мети, треба:

- проаналізувати методи інтенсифікації масообміну в газорідних апаратах за допомогою додаткового підведення енергії способом накладання коливань;

- вивчити та узагальнити закономірності впливу сил поверхневого натягу на процеси гідродинаміки і масообміну в насадкових апаратах;

- класифікувати відомі регулярні насадки та проаналізувати конструктивні методи їх удосконалення;

- вибрати доцільний метод підвищення ефективності регулярних насадок і на його основі розробити насадки нових типів;

- відібрати найхарактерніші різновиди розроблених насадок, експериментально дослідити їхні робочі характеристики і встановити оптимальні параметри роботи;

- експериментально дослідити і класифікувати режими утворення крапель при стіканні рідини з зубців і режими краплинно-плівкової течії в регулярних насадках із зубчастими отворами;

- теоретично визначити й експериментально перевірити основні капілярні співвідношення і на їх основі запропонувати принципи розрахунку розмірів головних конструктивних елементів регулярних насадок із зубчастими отворами;

- описати регулярні насадки розроблених різновидів і особливості їх конструювання відповідно до умов проведення процесу та розробити рекомендації щодо їх використання;

- перевірити здатність розроблених насадок до роботи у виробничих умовах.

**Об'єкт дослідження** – масообмін в газорідних насадкових апаратах харчових виробництв.

**Предмет дослідження** – регулярні насадки для масообмінних апаратів.

**Методи дослідження** – аналітичні, теоретичні, експериментальні.

Відповідно до умов газорідних масообмінних апаратів проаналізовано, систематизовано та упорядковано відомі теоретичні й експериментальні дослідження поширення гравітаційних, неперервних і

динамічних хвиль в одно- і двофазних гомогенних середовищах, зокрема при плівковій течії; розраховано локальні зміни параметрів газорідної системи внаслідок проходження уповільненого стрибка ущільнення.

Розміри крапель визначено ваговим методом, швидкість течії рідини – методом трасування з використанням осцилографа. Концентрації вуглекислого газу у воді визначено методом титрування, концентрації етанолу – флотометричним способом.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Вперше:

- розв’язанням рівнянь балансу сил гравітації і поверхневого натягу виведено капілярні співвідношення для визначення висоти підняття рідини перед відриванням крапель від нижнього краю пластини нескінченної довжини, максимальної висоти звисання рідини у момент відривання крапель, максимальних діаметрів і висот звисання крапель у момент початку відривання від зубців, максимальних висот і діаметрів газових бульбашок у момент початку відривання від плоского барботера;

- розширено застосування теорії поверхневих явищ на клас процесів масообміну, що відбуваються в газорідних системах, у яких визначальний геометричний розмір частинок дисперсної фази співмірний з розміром капілярної сталої або менший від неї;

- запропоновано і реалізовано новий метод інтенсифікації масообміну в апаратах з регулярними насадками за допомогою виконання в листах насадок зубчастих отворів, що сприяє переходу від плівкової до краплинно-плівкової течії по насадці;

- розроблено регулярні насадки нових типів – із зубчастими отворами та із зубчастими отворами і зубчастими пелюстками, в разі використання яких реалізується краплинно-плівкова течія;

- встановлено, досліджено і класифіковано режими утворення крапель при стіканні рідини з зубців та режими краплинно-плівкової течії рідини в насадках із зубчастими отворами;

- розроблено класифікацію та визначено межі зон інтенсивностей взаємодії фаз в умовах краплинно-плівкової течії;

- досліджено гідродинамічні та масообмінні характеристики розроблених насадок трьох типових різновидів із зубчастими отворами, виведено розрахункові формули, визначено межі застосування, оптимальні параметри роботи та розроблено рекомендації щодо застосування регулярних насадок;

- запропоновано метод розрахунку розмірів основних конструктивних елементів регулярних насадок з використанням капілярної сталої.

Дістали подальший розвиток:



– теорія інтенсифікації масообміну в газорідних апаратах за допомогою неперервних і динамічних хвиль та концепція про можливість використання уповільнених стрибків ущільнення, генерованих за допомогою механічних пристроїв з реальними швидкостями руху робочих органів;

– закономірності плівкової течії за наявності неперервних і динамічних хвиль та їх взаємодії;

– класифікація регулярних насадок за конструктивними ознаками, які впливають на ефективність тепломасообміну;

– класифікація методів інтенсифікації процесу абсорбції за допомогою коливань різних масштабних рівнів;

– систематизація питань впливу поверхневих явищ на процеси гідродинаміки і масообміну в насадкових колонах;

– положення про те, що гідродинамічне моделювання тепломасообмінних процесів є приблизним, тому що не враховує зворотного впливу на гідродинаміку ефектів Марангоні та неперервних і динамічних хвиль, що можуть утворюватися внаслідок масообміну.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.** Наукові положення, які стосуються капілярних співвідношень для конструктивних елементів насадок, доведені через математичні перетворення, справджуються у межах початкових допущень та накладених граничних умов, не суперечать відомим законам і підтверджуються уже відомими та додатково одержаними автором експериментальними даними.

Теоретичні закономірності зміни параметрів двофазного потоку після проходження уповільненого стрибка ущільнення проілюстровано прикладом розрахунку, результати якого свідчать про реальність математичної моделі.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, щодо робочих характеристик досліджених насадок та умов ефективного застосування їх, підтверджено експериментальними дослідженнями на лабораторних стендах з використанням сучасних методик та практикою експлуатації насадок на виробництві.

**Наукове значення роботи.** Теоретично встановлені капілярні співвідношення доповнюють і уточнюють теорію утворення менісків, капілярних течій та тепломасообміну в системах з розвинутою поверхнею контакту фаз газ-рідина і в системах з розвиненим контактом рідини з твердою фазою.

Наукові результати експериментальних досліджень регулярних насадок із зубчастими отворами розширюють арсенал методів інтенсифікації тепломасообміну в насадкових апаратах.

Встановлення і класифікація режимів краплинно-плівкової течії, визначення інтенсивностей взаємодії фаз при краплинно-плівковій течії, класифікація режимів стікання рідини з зубців та способів інтенсифікації абсорбції за допомогою коливань різних масштабних рівнів доповнюють наукові знання про ці процеси, сприяють розвитку їх теорії і дають можливість обґрунтувати специфічні методи впливу на інтенсивність перебігу процесу в кожному окремому випадку.

Додаткове вивчення та узагальнення закономірностей поширення і взаємодії неперервних і динамічних хвиль, які виникають внаслідок змінення концентрацій компонентів під впливом масообміну, поглиблюють знання про коливально-хвильові явища в газорідних системах і можуть бути використані для подальшого розроблення теорії інтенсифікації процесів масообміну за допомогою накладання коливань з урахуванням взаємодії штучно накладених коливань і власних коливань системи.

**Практичне значення отриманих результатів.** Теоретичні результати досліджень можуть бути використані науково-дослідними і проектними організаціями для проектування і впровадження у виробництво ефективних абсорбційних апаратів.

Результати експериментальних досліджень гідродинамічних і масообмінних характеристик та методику розрахунку розмірів основних конструктивних елементів регулярних насадок із зубчастими отворами можна використати для розроблення нових, з вищими техніко-економічними показниками і меншими енергетичними витратами, протитечійних колонних апаратів та модернізації існуючих апаратів, в яких проводять тепломасообмінні процеси у харчовій, мікробіологічній, переробній та інших галузях промисловості.

Значна кількість описаних різновидів розроблених насадок і аналіз особливостей їхньої роботи дають змогу обґрунтовано підходити до вибору таких типів насадок, які забезпечать конкретні технологічні умови перебігу процесу з урахуванням фізико-хімічних властивостей робочих середовищ, допустимих температур, тисків, гідравлічних опорів апаратів, ВОП, розподілу зрошення та дифузійних опорів в окремих фазах.

Науково-технічний ефект полягає в розширенні знань про режими краплинної і краплинно-плівкової течії, про умови виникнення режиму емульгування і сумісного руху обох фаз у двофазних системах, про закономірності масообміну в регулярних насадках із зубчастими отворами, про роль поверхневого натягу як фундаментального параметра, який

характеризує і забезпечує зв'язок між фазами та інтенсивність обмінних процесів біля поверхні й крізь поверхню поділу фаз, а також про розроблення регулярних насадок принципово нового виду з організацією упорядкованої краплинно-плівкової течії.

На основі запропонованого методу інтенсифікації тепломасообміну за допомогою організації краплинно-плівкової течії розроблено ряд нових різновидів регулярних насадок. Апарати з розробленими насадками впроваджено на чотирьох підприємствах харчової промисловості. Матеріали досліджень використано в проектних розробках обладнання для спиртової і виноробної галузей промисловості.

Найбільший економічний і соціальний ефекти можна одержати від впровадження апаратів з розробленими насадками в системи очищення великих об'ємів газів перед викиданням їх в атмосферу.

Результати досліджень відображено в підручнику і двох навчальних посібниках з процесів і апаратів харчових виробництв і використовуються в навчальному процесі при підготовці фахівців різних галузей харчової промисловості.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертації, зокрема обґрунтування ідей про створення регулярних насадок з краплинно-плівковою течією та необхідність урахування дії сил поверхневого натягу в системах з розвиненою поверхнею контакту фаз, про вплив масообміну на утворення неперервних і динамічних хвиль та про прямий і зворотний зв'язок між коливально-хвильовими і масообмінними процесами, практичне розроблення конструкцій насадок з проведенням літературних і патентних досліджень та оформленням матеріалів заявок на винаходи, експериментальні дослідження режимів течії і взаємодії фаз та робочих характеристик насадок, оброблення експериментальних даних та їх аналіз, розроблення методики розрахунку розмірів основних конструктивних елементів насадок з урахуванням сили поверхневого натягу, формування задач та складання балансових рівнянь для встановлення капілярних співвідношень, висновки щодо доцільності застосування в різних умовах насадок окремих різновидів зроблено особисто автором.

Внесок автора у підготовку публікацій є основним.

Математичні перетворення, щодо аналізу поширення і взаємодії неперервних і динамічних хвиль та розв'язання рівнянь для встановлення капілярних співвідношень, виконано разом з к.т.н., доцентом О.О. Дубініним та к.т.н. Г.О. Тахістовою.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: Седьмой республиканской конференции “Повышение эффективности,

совершенствование процессов и аппаратов химических производств” (Львов, 1988); Всесоюзной конференции “Современные машины и аппараты химических производств. Химтехника-88” (Чимкент, 1988); Республиканской научно-технической конференции “Интенсификация технологий и совершенствование оборудования перерабатывающих отраслей АПК” (Киев, 1989); Всесоюзной научной конференции “Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания” (Харьков, 1990); Республиканской научно-технической конференции “Разработка и внедрение высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, оборудования и новых видов пищевых продуктов в пищевую и перерабатывающие отрасли АПК” (Киев, 1991); Шестой всесоюзной конференции по теории и практике ректификации (Северодонецк, 1991); Міжнародній науково-технічній конференції “Розробка та впровадження нових технологій і обладнання у харчову та переробні галузі АПК” (Київ, 1993); Всеукраїнській науково-технічній конференції “Розробка та впровадження прогресивних технологій та обладнання у харчову та переробну промисловість” (Київ, 1995); Дев’ятій міжнародній конференції “Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв” (Одеса, 1996); Міжнародній науково-технічній конференції “Розроблення та впровадження прогресивних ресурсощадних технологій та обладнання в харчову та переробну промисловість” (Київ, 1997); Международной научно-технической конференции “Техника и технология пищевых продуктов” (Могилев, 1998); Десятій міжнародній конференції “Вдосконалення процесів та апаратів хімічних та харчових виробництв” (ІССЕ-99), (Львів, 1999); Шостій міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми та перспективи створення і впровадження нових ресурсо- та енергоощадних технологій, обладнання в галузях харчової і переробної промисловості” (Київ, 1999); Міжнародній науково-технічній конференції “Розроблення та виробництво продуктів функціонального харчування, інноваційні технології та конструювання обладнання для перероблення сільгоспсировини, культура харчування населення України” (Київ, 2003).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковано у монографії, підручнику, двох навчальних посібниках, одній брошурі та 22 статтях у фахових виданнях, захищені 17 авторськими свідоцтвами СРСР та 16 патентами України.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації 429 с.: 289 с. основного тексту, 53 с. з рисунками, бібліографії 337, зокрема 77 патентних матеріалів, дев’ять додатків на 52 с.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, визначено мету та завдання дослідження, оцінено значення отриманих результатів.

У першому розділі на основі вивчення літературних джерел сформульовано основні вимоги до регулярних насадок. З метою забезпечення умов тісної взаємодії газу і рідини при якнайменших витратах енергії на контактування фаз та надійної експлуатації насадки повинні мати розвинену поверхню і малий об'єм одиниці поверхні, зручну обтікальну форму без надмірних виступів і порожнин, які можуть утворювати застійні зони, мати малу утримуючу здатність щодо рідини, мало забруднюватись, легко монтуватись і замінюватись, мати достатню механічну міцність, відповідну термічну і корозійну стійкість.

Виділено наступні конструктивні засоби підвищення ефективності пакетних насадок: перфорування, гофрування і рифлення листів, використання сітчастих і просічно-витяжних матеріалів, застосування перегородок, турбулізувальних вставок, завихрювачів, відбортовок, ободів, козирків.

Запропоновано класифікацію основних видів пакетних насадок за конструктивними ознаками, які суттєво впливають на характер руху та ефективність контактування фаз: плоскопаралельні насадки, перфоровані, гофровані, z-подібні, стільникові і щілинні, рулонні, з гофрованих сітчастих матеріалів, рифлені, з просіченими пелюстками, комбіновані. Описано особливості цих насадок. Показано, що необхідними умовами ефективної роботи колон з регулярними насадками є рівномірний розподіл рідини, добра змочуваність поверхні насадки, застосування розподілювачів і перерозподілювачів рідини, доцільне поєднання різних конструктивних елементів, проста форма та забезпечення тісного контактування фаз.

Запропоновано варіант використання стільникових насадок для масообміну в барботажному режимі, на основі якого розроблено захищений авторським свідоцтвом винахід апарат для дезодорації жирів і олій.

Перебіг процесів при плівковій течії має нестационарний характер і залежить від шляху, пройденого плівкою. Інтенсивніше відбуваються процеси на вхідних і кінцевих ділянках руху. Щоб інтенсифікувати масообмін, кінцеві ефекти доцільно створювати за рахунок гравітаційної сили добиранням оптимальної форми елементів насадок.

На масовіддачу у рідкій фазі суттєво впливає гідродинамічний стан поверхневого шару рідини, який обумовлюється особливостями течії, формою поверхні плівки, впливом газового потоку і сил поверхневого натягу.

Масообмін у газовій фазі в апаратах з регулярними насадками практично відбувається при дотурбулентних значеннях чисел Рейнольдса для газу, проте внаслідок збурювального впливу конструктивних елементів характер руху відповідає турбулентному. Ефективність масообміну зростає з посиленням турбулізуючої дії конструктивних елементів та зі зменшенням відстані між ними і є функцією гідравлічного опору.

Накладанням низькочастотних коливань на поверхню, якою стікає плівка, можна підвищити інтенсивність масовіддачі у рідкій фазі на 50...100 %, але внаслідок складності та ненадійності цей спосіб не застосовують.

Доцільнішими є періодичні збурення плівки конструктивними засобами за допомогою гофрів, рифлень, перерозподільних елементів, а також спосіб періодичного розривання і повторного формування плівок.

Щоб підвищити ефективність масообміну, розроблено і запропоновано нові перфоровані насадки – пакетні насадки із зубчастими отворами. Застосування цих насадок забезпечує періодичне розривання плівки та утворення кінцевих ефектів. Також запропоновано насадки з просіченими пелюстками, що призначені для організації каскадного стікання рідини, зокрема насадки з пелюстками, нижні краї яких мають зубчасту форму і забезпечують краплинно-плівкову течію рідини. Пелюстки можуть бути відхилені у вертикальній і горизонтальній площинах під різними кутами і розміщені рядами або в шаховому порядку, що дає можливість конструювати насадки для різноманітних технологічних потреб.

Розроблені різновиди насадок є оригінальними. Тому необхідно експериментально дослідити їх робочі характеристики і розробити методику розрахунку та рекомендації щодо доцільного застосування.

**У другому розділі** проаналізовано коливально-хвильові явища в газорідних системах, зокрема у підрозділах 2–5, дотримуючись поглядів Уолліса [Уолліс Г. Одномерные двухфазные течения. Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 440 с.], розглянуто закономірності руху неперервних і динамічних хвиль на основі моделі одновимірного гомогенного середовища.

Процес масообміну, зокрема абсорбція компонента з газової фази у рідкий сорбент, складається з послідовного проходження чотирьох стадій: перенесення маси компонента всередині потоку газової фази до зони швидкої зміни концентрації, тобто до дифузійного примежового шару газу біля поверхні поділу фаз; перехід компонента крізь дифузійний примежований шар газової фази; перехід крізь дифузійний примежований шар

рідкої фази; перенесення компонента (вирівнювання концентрацій компонента) всередині рідкої фази від примежового шару в ядро потоку.

Всі стадії масообміну здійснюються послідовно, тому загальна швидкість процесу встановлюється на рівні швидкості найповільнішої стадії. Такою стадією у плівкових апаратах найчастіше є перенесення компонента у нетурбулізованій рідкій фазі. Крім того, коефіцієнти дифузії у рідкій фазі на кілька порядків нижчі від коефіцієнтів дифузії у газовій фазі. Тому, завдання інтенсифікації процесу масообміну у регулярних насадках зводиться переважно до прискорення перенесення компонента у рідкій фазі, яке досягається за допомогою її додаткової турбулізації накладанням пульсаційно-коливальних рухів.

Розрізняють мікро- і макропульсації. Пульсації на мікрорівні мають розмір збурень елементів потоку, сумірний з товщиною примежового шару. Вони оновлюють поверхню контакту фаз, збільшують градієнт концентрації (рушійну силу процесу масообміну) поблизу примежового шару. Пульсації макрорівня сумірні з розмірами апарата і сприяють вирівнюванню концентрації в усьому об'ємі фази.

Особливістю плівкових апаратів є мала товщина плівки при наявності двох примежових шарів: шару на границі з газовою фазою і шару на границі з твердою поверхнею, по якій стікає плівка. Між двома примежовими шарами при достатній швидкості течії існує більш турбулізований середній шар – ядро потоку. В умовах ламінарної течії всі три шари об'єднуються в один дифузійний шар з поперечним перенесенням маси компонента за механізмом лише молекулярної дифузії. Ламінарно-хвильові режими течії, що реалізуються у плівкових апаратах, характеризуються частковим перемішуванням середнього шару під впливом проходження хвиль різної природи.

Інтенсифікація перенесення маси в плівці повинна здійснюватись на основі впливу на всі три шари плівки. Зменшення гальмівного впливу пограншару на межі з твердою фазою значною мірою досягається розриванням плівки за допомогою перфорацій, на яких формуються краплі. Макротурбулізація середнього шару плівки (ядра потоку) може бути збільшена застосуванням коливально-хвильових явищ. Для активізації мікроперемішування пограншару на межі з газовою фазою можуть бути використані поверхневі явища. Останні два методи впливу на плівку розглянуто в цьому і наступному розділах.

1. Розглянуто механізм впливу коливальних різних масштабних рівнів на масообмін і запропоновано класифікацію методів застосування коливальних для інтенсифікації процесів абсорбції з урахуванням масштабних рівнів робочих зон апаратів.

Накладанням коливань потрібного масштабного рівня на ту фазу, в якій зосереджено основний опір процесу масопередачі, можна цілеспрямовано прискорювати перебіг найповільніших стадій процесу.

2. Описано закономірності поширення неперервних хвиль в одно- та двофазних гомогенних потоках, зокрема для плівкової течії. Акцентовано увагу на тому, що швидкість поширення неперервних хвиль при плівковій течії в півтора рази перевищує середню швидкість плівки. Неперервні хвилі (як і хвилі інших видів) переносять інформацію про змінення початкових і граничних умов в окремих зонах середовища, впливаючи на механізм тепломасообмінного перенесення у більш віддалених зонах.

У разі збільшення об'ємної частки газу в газорідному середовищі до 0,5 швидкість неперервних хвиль падає до нуля і настає захлинання апаратів.

3. Розглянуто рівняння руху динамічних хвиль. Ці рівняння збігаються з відомою (але практично не застосовуваною у теорії масообміну) формулою Вуда [Wood A.B. A Textbook of Sound. — London, Bell, 1941], згідно з якою за нормальних умов швидкість поширення динамічних хвиль у гомогенному газорідному середовищі зі зростанням об'ємної частки газу до 0,5 зменшується до 20 м/с. Це положення відкриває додаткові перспективи для інтенсифікації процесів масообміну в газорідних середовищах за допомогою штучно створюваних коливань при помірних швидкостях руху робочих органів вібраторів.

4. Охарактеризовано умови згасання і посилення збурень під час накладання неперервних і динамічних хвиль, зокрема показано, що стійка течія плівки в турбулентному режимі по нахиленій поверхні залежить від коефіцієнта тертя між рідиною і поверхнею і можлива лише при невеликих (у кілька градусів) кутах нахилу поверхні до горизонту.

5. Розглянуто ударні динамічні хвилі у гомогенних середовищах та особливості поширення стрибків ущільнення в газорідних системах. Якщо числа Маха (відношення швидкості поширення збурень до швидкості динамічних хвиль), що розраховані за параметрами газорідної суміші, перевищують одиницю, а числа Маха, що розраховані за параметрами газової фази, менші за одиницю, то в газорідній суміші реалізуються уповільнені стрибки ущільнення, під час проходження яких параметри середовища змінюються слабкіше, ніж у сильних стрибках, але досить інтенсивно, щоб за їхньою допомогою можна було інтенсифікувати гідродинамічні режими в масообмінних апаратах.

6. Проаналізовано дані літературних джерел та попередніх власних досліджень про вплив хвиль на масообмін у плівці. Показано, що інтенсифікувати масообмін у плівці за допомогою накладання коливань найдоцільніше конструктивним способом з використанням енергії



гравітації, зокрема періодичним розриванням і наступним формуванням плівок на коротких ділянках течії.

У цілому з розділу випливає, що в процесі масообміну утворюються хвилі концентраційного походження, які накладаються на хвилі гідродинамічного походження і змінюють гідродинамічні умови в технологічних апаратах.

Моделювання масообмінних процесів на гідродинамічних стендах не враховує зворотного впливу масообміну на гідродинаміку і є приблизним.

Штучне створення динамічних хвиль та уповільнених стрибків ущільнення, що поширюються з досить помірними швидкостями (порядку 50...70 м/с), розширює можливості інтенсифікації масообмінних процесів у газорідних системах.

У **третьому розділі** обґрунтовано необхідність урахування сил поверхневого натягу при аналізі процесів в апаратах з регулярними насадками.

Розглянувши для сферичного об'єму рідини з лінійним розміром  $\ell$  приблизний баланс сил поверхневого натягу  $P_{\text{пов}} = \sigma \ell$  і об'ємних (гравітаційних) сил  $P_{\text{об}} = \frac{\rho \ell^3}{6} Dc g \approx \frac{\ell^3}{2} Dc g$ , з'ясували, що  $\ell \approx \sqrt{\frac{2\sigma}{Dc g}} = a$ , тобто

дальність дії  $\ell$  сили поверхневого натягу  $\sigma$  у насадкових колонах з гравітаційною течією і слабкою взаємодією фаз (яка не врахована) дорівнює капілярній сталій  $a$  (сталій Лапласа), величина якої для поширених рідин лежить у межах 2...4 мм ( $\Delta\rho$  – різниця густин рідини і газу,  $\text{кг/м}^3$ ).

У насадкових апаратах з фіксованою поверхнею контакту фаз сили поверхневого натягу співмірні з об'ємними силами, а площа поверхні рідини співмірна з площею поверхні насадок, тому сили поверхневого натягу, що діють на межах поділу фаз газ–рідина і рідина–тверде тіло, суттєво впливають на процеси гідродинаміки та тепломасообміну і мають враховуватися в енергетичних балансах.

Будь-які змінення зовнішніх параметрів на межі рідкої фази (температури, тиску, концентрації) супроводжуються переукомплектуванням молекул зовнішнього ряду поверхні та перебудовою приповерхневого шару рідини завтовшки порядку одного десятка середніх розмірів молекул за законом мінімуму поверхневої енергії і породжують мікрорухи у поверхневих шарах рідини, що сприймається як змінення поверхневого натягу. Внаслідок цього реагування рідини на зовнішні впливи переходить від первинного молекулярного рівня до рівня конвективного перенесення.

Від дії поверхневих сил у місцях утворення менісків виникає додатковий лапласівський тиск, змінюються характер течії рідини,

парціальні тиски компонентів та умови фазової рівноваги, що впливає на інтенсивність масообміну. Зміни поверхневого натягу впливають на характер хвильової течії. Наприклад, зі зменшенням поверхневого натягу зменшуються довжина і фазова швидкість хвиль, збільшується їхня амплітуда, внаслідок чого підвищується ефективний коефіцієнт перемішування в плівці.

Наявність сил лише поверхневого натягу (без впливу будь-яких інших сил) є достатньою умовою для розпаду ламінарних водяних циліндричних струменів і плівок на краплі. Мінімальну довжину ділянок циліндра  $\ell_{\text{ц}}$ , з яких в умовах статички утворюються краплі, розраховували за умови рівності площі поверхні циліндра  $S_{\text{ц}} = 2\pi r_{\text{ц}} \ell_{\text{ц}}$  і площі сферичної поверхні краплі  $S_{\text{кр}} = 4\pi r_{\text{кр}}^2$ , звідки  $\ell_{\text{ц}} = 2r_{\text{кр}}^2/r_{\text{ц}}$ . У цьому співвідношенні невідомий радіус краплі  $r_{\text{кр}}$  визначали з умови рівності об'ємів циліндра і утвореної з нього краплі  $\pi r_{\text{ц}}^2 \ell_{\text{ц}} = \frac{4}{3} \pi r_{\text{кр}}^3$ .

Підставивши в останнє рівняння  $\ell_{\text{ц}}$ , одержали  $r_{\text{кр}} = 1,5r_{\text{ц}}$  і  $\ell_{\text{ц}} = 4,5r_{\text{ц}}$ . Це означає, що якщо довжина циліндра в 4,5 рази перевищує його радіус, то створюється умова нестійкості циліндричного струменя, при якій площа поверхні утвореної краплі стає меншою від площі бокової поверхні циліндра, тобто процес розпаду циліндра стає енергетично вигідним. Радіус утворених крапель за цієї умови у півтора рази перевищує радіус циліндра.

З розпадом ламінарних струменів утворюються близькі за розміром краплі основного спектра, загальна маса яких перевищує 99 %, і вузький спектр дрібних крапель (крапель Плато), діаметр яких на порядок менший від діаметра крапель основного спектра. Краплі Плато формуються на кінцевому етапі розривання перетинок між великими краплями. Ці тонкі видовжені перетинки також можуть розглядатись як рідкі циліндри, що теж розпадаються на краплі. При малій довжині перетинок звичайно утворюється одна крапля Плато, при великій довжині – 2÷3 краплі.

Великими краплями запропоновано називати такі, для яких об'ємні й поверхневі сили співмірні, а малими – такі, для яких поверхневі сили на порядок і більше перевищують об'ємні сили. До великих належать краплі, що утворюються на звисаючих елементах насадок.

Поверхню крапель відносно об'єму слід вважати досить розвиненою. Цією поверхнею краплі неперервно обмінюються енергією і масою із зовнішнім середовищем, внаслідок чого практично не бувають у рівноважному стані, а завжди рухаються, осцилюють, ростуть або зменшуються, нагріваються, охолоджуються, об'єднуються, розпадаються.

Чим менший розмір крапель, тим більша їхня відносна поверхня і поверхнева енергія і тим активніше відбувається міжфазний обмін.

Внаслідок локальних змінень поверхневого натягу виникають рухи поверхневих шарів рідини, утворюються капілярні хвилі та супутні явища, названі ефектами Марангоні. Місцеві градієнти поверхневого натягу можуть виникати як спонтанно внаслідок перебігу технологічних процесів, так і в результаті організованої дії різниці концентрацій, температур, тисків, густин електричних і магнітних полів.

Таким чином, коефіцієнт поверхневого натягу як фундаментальний параметр, який забезпечує зв'язок між фізико-хімічними, гідромеханічними і тепломасообмінними процесами на міжфазній поверхні та всередині рідкої фази, може бути використаний для інтенсифікації масообміну в газорідних системах з розвиненою поверхнею, в яких визначальний геометричний розмір дисперсних частинок співмірний з розміром капілярної сталої або менший від неї, зокрема в апаратах з регулярними насадками.

**У четвертому розділі** описано дослідну установку, будову досліджених насадок, методики проведення експериментів та опрацювання одержаних даних.

Установка (рис. 1) для дослідження гідродинаміки і масообміну в трьох типових регулярних насадках із зубчастими отворами в режимі протитечії фаз включала в себе дослідну колону з насадкою, системи подавання й відведення повітря і води, системи подавання етилового спирту і вуглекислоти та систему вимірювальних приладів. За еталон взяли показану

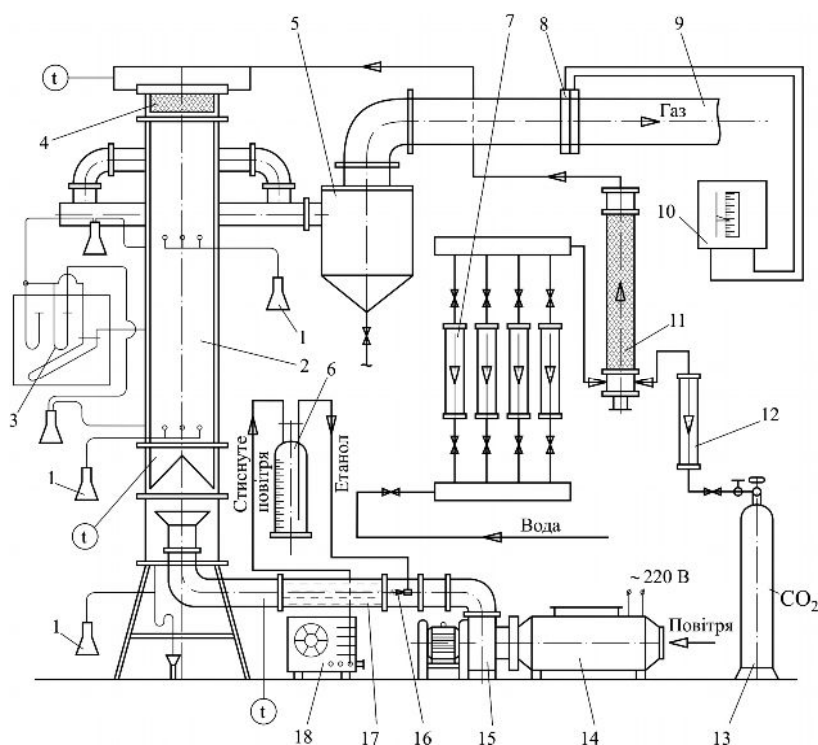


Рис. 1. Схема експериментального стану:

1– пробовідбірники; 2 – колона; 3 – дифманометри; 4 – зрошувач; 5 – циклон; 6 – мірний циліндр; 7– ротаметри води; 8 – діафрагма; 9 – система відведення газу; 10 – ротаметр повітря; 11 – абсорбер; 12 – ротаметр вуглекислого газу; 13 – балон вуглекислого газу; 14 – калорифер; 15 – вентилятор; 16 – форсунка; 17 – випаровувач; 18 – на рис. 2, а плоскопаралельну насадку (ППН), характеристики якої досліджували на цій же установці.

Колона 2 (рис. 1) з органічного скла (прозора) мала квадратний переріз  $0,2 \times 0,2 \text{ м}^2$ , загальну висоту 1,8 м, висоту дослідної ділянки 0,8 м. Зверху і знизу дослідної ділянки розміщувались ділянки стабілізації потоків. Під час досліду локальна нерівномірність розподілу рідини на насадці не перевищувала  $\pm 12 \%$ .

Проби рідини при різних витратах фаз відбирали у колби 1 з верхнього і нижнього перерізів дослідної ділянки та з гідрозатвору. Колона працювала при атмосферному тиску. Перепади тиску в дослідній ділянці вимірювали U-подібними дифманометрами 3. У кожному досліді вимірювали витрати води, повітря, етанолу або вуглекислого газу, надлишковий тиск у колоні та перепади тиску у дослідній ділянці, температури робочих середовищ на вході в колону та на виході з неї, аналізували проби рідини.

Насадка із зубчастими отворами (НЗО), фрагмент листа якої показано на рис. 2, б, відрізняється від ППН тим, що в її листах виштамповано в

шаховому порядку горизонтально видовжені прямокутні отвори із зубчастими верхніми краями.

Насадка із зубчастими отворами і гофрама (НЗОГ) відрізняється від НЗО наявністю горизонтальних гофрів z-подібної форми, розміщених між горизонтальними рядами отворів (рис. 2, в).

Насадку з просіченими зубчастими отворами і відхиленими пелюстками (НЗП) показано на рис. 2, г. Зубчасті пелюстки виготовлено просіканням отворів по контуру, крім верхньої горизонтальної лінії. По цій лінії пелюстки відхилено під таким кутом до площини листа, щоб перекрити дві третини відстані між листами. Щоб забезпечити каскадне стікання рідини вертикальними рядами пелюсток, у парних і непарних листах пакета насадки пелюстки зміщено на половину кроку.

Швидкість течії і тривалість перебування рідини на насадці визначали методом введення індикатора і записування кривих відгуку за допомогою багатоканального світло-променевого осцилографа.

Вивчаючи утворення крапель під час витікання рідини з піпеток (циліндричних скляних трубок із центральним отвором), використовували спеціальний пристрій зі штативом. Розмір (середній діаметр) крапель розраховували за їхньою масою, вважаючи краплі сферичними. Послідовність стадій утворення і відривання крапель фотографували.

Масообмін у рідкій фазі вивчали на процесі десорбції вуглекислого газу з водних розчинів повітрям, у газовій фазі – на абсорбції водою пари етилового спирту із суміші з повітрям. Масообмінні характеристики розраховували за загальноприйнятою методикою.

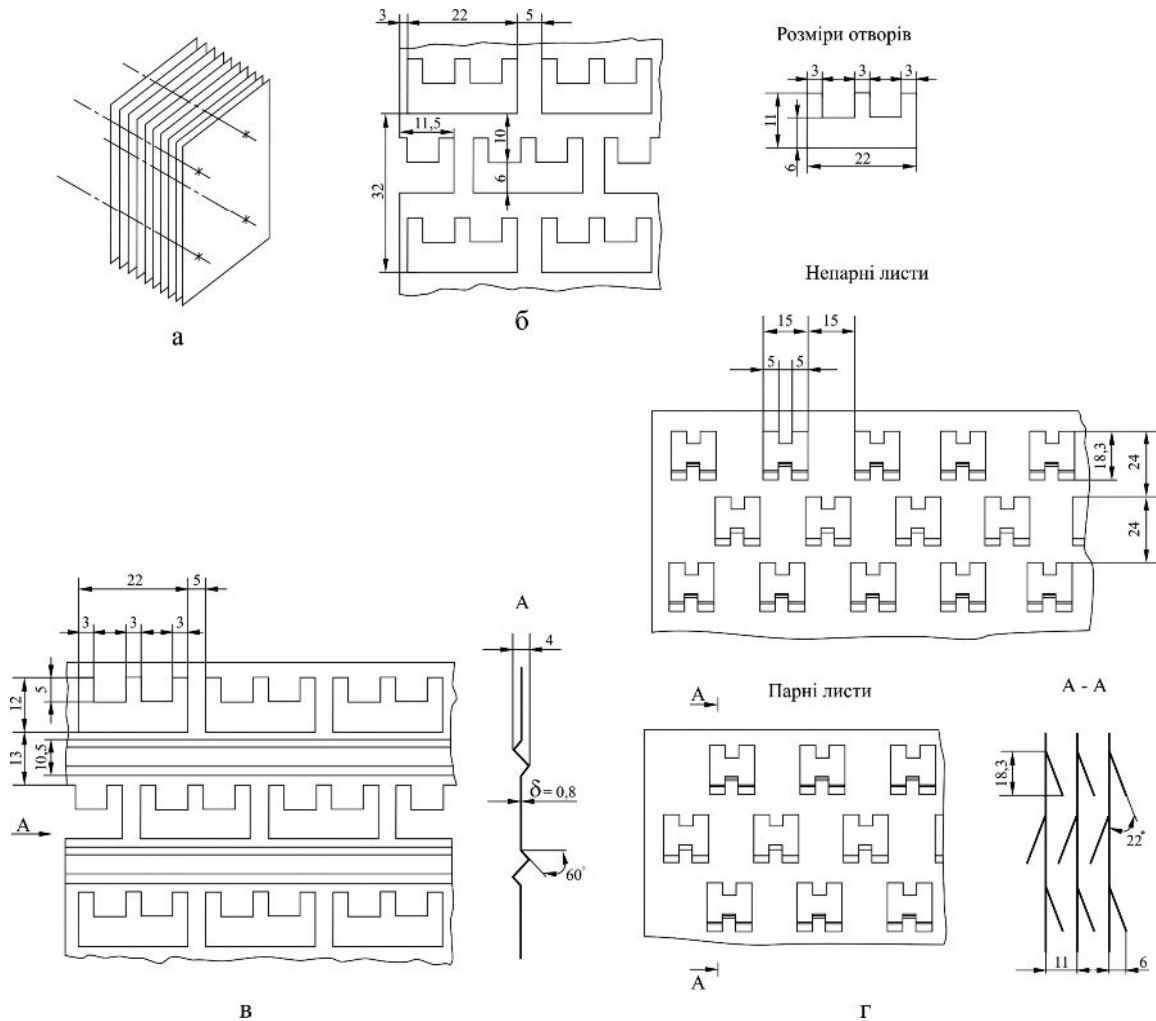


Рис. 2. Фрагменти насадок:  
а – ППН; б – НЗО; в – НЗОГ; г – НЗП

У п'ятому розділі наведено результати гідродинамічних досліджень.

1. Експериментально встановлено існування і вперше зроблено класифікацію таких режимів утворення крапель при витіканні рідини з піпеток (в порядку зростання витрати рідини): рівноважний, вільний, резонансний, ланцюговий, струменевий, розпилювальний. Описано особливості течії і межі існування режимів та запропоновано принципові функціональні залежності для розрахунку діаметрів крапель.

Вільний, резонансний, ланцюговий та струменевий режими реалізуються також при стіканні рідини із зубців насадок. Вільний режим характеризується відриванням кожної наступної краплі через деякий час після відривання попередньої, тобто наявністю певної відстані між краплями. У резонансному режимі краплі відриваються з частотою коливань тієї частини рідини, що залишилась після відривання

попередньої краплі ( $4...5 \text{ c}^{-1}$ ). При ланцюговому витіканні краплі поблизу отвору піпетки доторкаються одна до одної (нагадуючи ланцюг) і роз'єднуються лише на певній відстані від піпетки. При струменевому режимі рідина витікає суцільним (без перетяжок) струменем, який згодом розпадається на краплі, що рухаються близькими траєкторіями.

2. Досліджено гідродинаміку течії рідини для насадок описаних вище різновидів. При краплинно-плівковій течії рідина стікає поверхнею листів плівкою, яка на отворах щоразу розривається і на зубцях утворює краплі. Після падіння на нижні краї отворів ці краплі знову розплющуються в плівки. Для однофазної течії встановлено існування та межі реалізації не описаних раніше режимів краплинно-плівкової течії:

- з ініційованою течією крапель;
- з ініційованою течією крапель і ділянками ланцюгової течії;
- окремими струмінцями;
- широкими струменями.

Ознакою ініційованої течії є відривання крапель від зубців під впливом імпульсу тих крапель, що впали зверху, внаслідок чого періодично утворюються каскади крапель, які змійками збігають у напрямку діагонального розміщення зубців.

Збільшення щільності зрошення  $\Gamma$ ,  $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ , супроводжується накладанням на ініційовану течію ділянок ланцюгової течії і подальшим переходом в течію окремими струмінцями. Внаслідок цього між вертикальними суцільними струмінцями  $9...18 \text{ мм}$  завширшки спонтанно пробігають змійки та ланцюжки крапель.

Широкі струмені стікають досить потужними потоками і через отвори об'єднують плівки з обох сторін листа в одне ціле.

Рідина рівномірніше розподіляється у перших двох режимах.

3. Для протитечії показано, що в апаратах з перфорованими насадками газовий потік взаємодіє з рідиною інтенсивніше, ніж в апаратах з ППН. Описано ознаки та запропоновано класифікацію інтенсивностей взаємодії фаз: слабка, відчутна, інтенсивна, сильна. Встановлено відповідність між інтенсивністю взаємодії фаз та характером течії рідини і гідравлічним опором насадок.

Якщо взаємодія фаз слабка, то встановлюються режими течії, характерні для однофазного потоку, якщо відчутна – дещо вирівнюється рівномірність течії, а режими течії змінюються при більших на  $5...15 \%$  значеннях  $\Gamma$ .

4. В умовах інтенсивної та сильної взаємодій фаз зафіксовано нові режими краплинно-плівкової течії: з рівномірною, нерівномірною і нестійкою течією крапель. Режим рівномірної течії (найсприятливіший для масообміну) реалізується в НЗО при швидкостях повітря  $v_{\Gamma, \text{в}} = 4...6 \text{ м/с}$ ,

коли маса завислих крапель збільшується, а інтенсивна осциляція їх породжує періодичні коливання капілярного підняття рідини з перевищенням висоти зубців, що обумовлює часткове перетікання рідини на сусідні зубці і утворення досить постійної періодичності відривання крапель.

Нерівномірною течією спостерігається при щільностях зрошення, що перевищують  $0,07 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$ , та відносних швидкостях повітря, більших як  $4,0 \text{ м/с}$ , і характеризується хаотичним утворенням і зникненням окремих струмінців у різних місцях поверхні насадки на фоні течії краплями збільшеного розміру. Нестійка течія настає при швидкостях повітря, більших від  $6,0 \text{ м/с}$ , і проявляється в посиленні підвисання і пульсації крапель та епізодичному невертикальному їх падінні, що свідчить про наближення режиму емульгування.

У зоні інтенсивної взаємодії фаз для НЗОГ спостерігаються додаткові режими течії: з епізодичним відриванням крапель від вершин гофрів та з інтенсивним зависанням рідини і невертикальним падінням крапель.

Запропоновано діаграми зон інтенсивностей взаємодії фаз з нанесеними на них режимами краплинно-плівкової течії для НЗО і НЗОГ.

Течія рідини по НЗП характеризується одночасною наявністю потоків двох типів: які стікають по верхній поверхні пелюсток, і які стікають у міжряддях пелюсток. У потоках різних типів, як правило, реалізуються свої режими течії.

Встановлено, що в НЗП при підвищених витратах фаз (під час сильної їх взаємодії) можна створювати стійкі зони емульгування за допомогою збільшення кута відхилення пелюсток у вибраному горизонтальному перерізі.

5. Методом трасування виміряно середні значення швидкостей стікання рідини в досліджених насадках і встановлено, що за відношенням максимальної і середньої швидкостей, яке змінюється в межах від  $1,20$  до  $1,45$ , краплинно-плівкова течія є перехідною течією між ламінарним і турбулентним режимами.

6. Визначено гідравлічні опори, розраховано коефіцієнти гідравлічних опорів досліджених насадок та складено емпіричні рівняння для їх обчислення.

Питомі гідравлічні опори насадок показано на рис. 3 і 4. Переломи ліній для НЗО при відносній швидкості повітря  $v_{г.в} \approx 1,8 \text{ м/с}$  і для НЗОГ – при  $v_{г.в} \approx 1,45 \text{ м/с}$  відображають перехід руху повітря до турбулентного. Режим руху повітря в НЗП при  $v_{г.в} \geq 0,8 \text{ м/с}$  характеризується як турбулентний, чому сприяють пелюстки насадки.



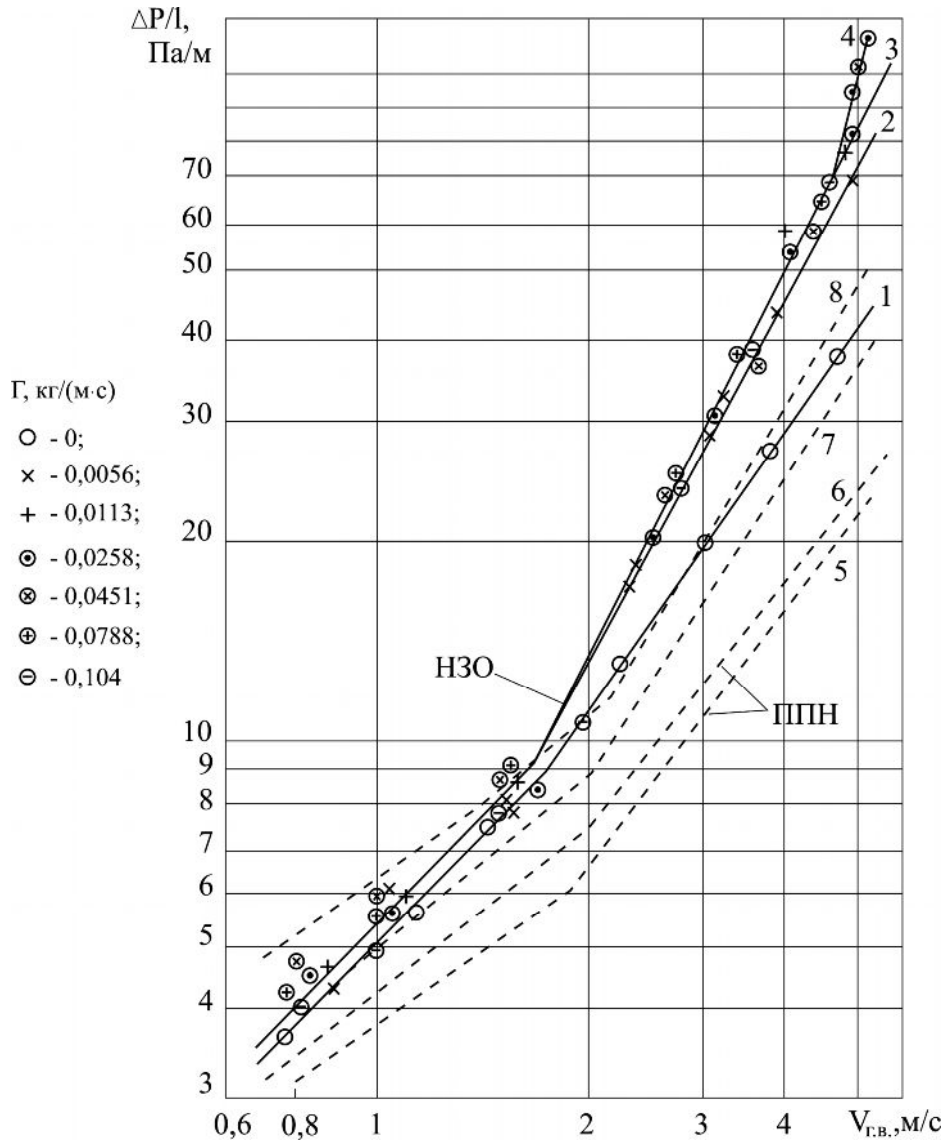


Рис. 3. Гідравлічні опори НЗО при різних щільностях зрошення  $\Gamma$ , кг/ (м·с): 1 – 0 (суха насадка); 2 – 0,0056...0,0113; 3 – 0,0258...0,0451; 4 – 0,0596...0,104. Штрихові лінії характеризують ППН при  $\Gamma$ , кг/ (м·с): 5 – 0; 6 – 0,0113; 7 – 0,0341; 8 – 0,104

**У шостому розділі** наведено результати досліджень масообміну.

1. Експериментальні значення висот одиниці перенесення маси у рідкій фазі  $h_p$ , м, насадок (при десорбції  $\text{CO}_2$ ) показано на рис. 5 і описано рівняннями виду  $h_p = Aa\text{Re}_p^m \text{Re}_{Г.В.}^n \text{Pr}_p^{0,67}$ , в якому на відміну від загальноприйнятого виду рівняння для плівкової течії замість товщини плівки введено капілярну сталу  $a$  і додатково, за допомогою  $\text{Re}_{Г.В.}$ , враховано вплив

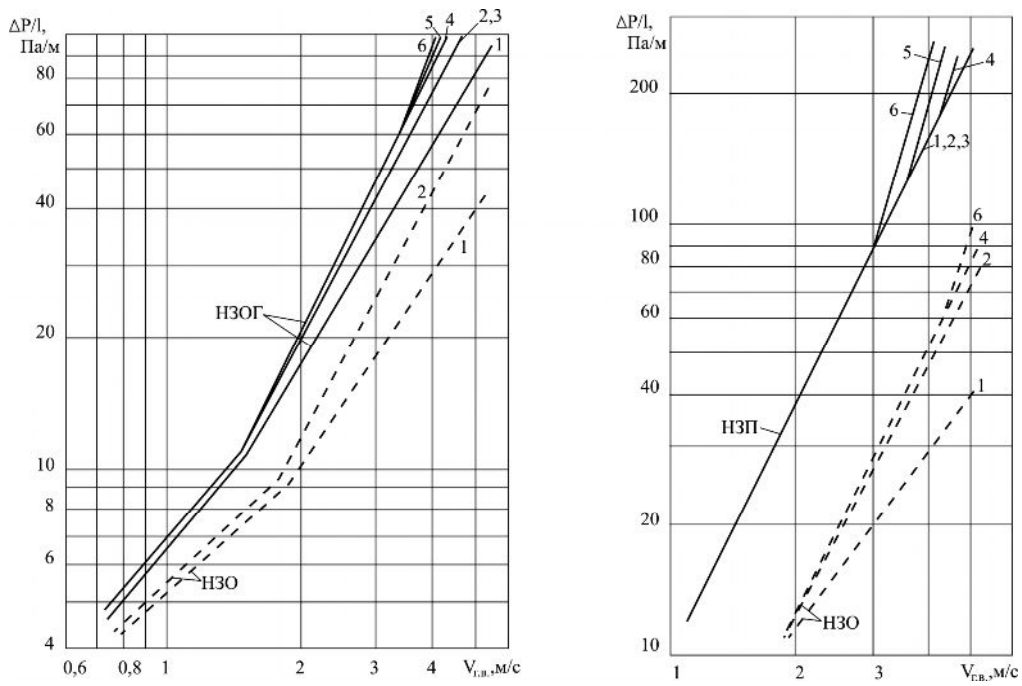


Рис. 4. Гідравлічні опори НЗОГ і НЗП при різних щільностях зрошення  $\Gamma$ , кг/(м·с): 1 – 0; 2 – 0,0113; 3 – 0,0196; 4 – 0,0341; 5 – 0,0596; 6 – 0,104

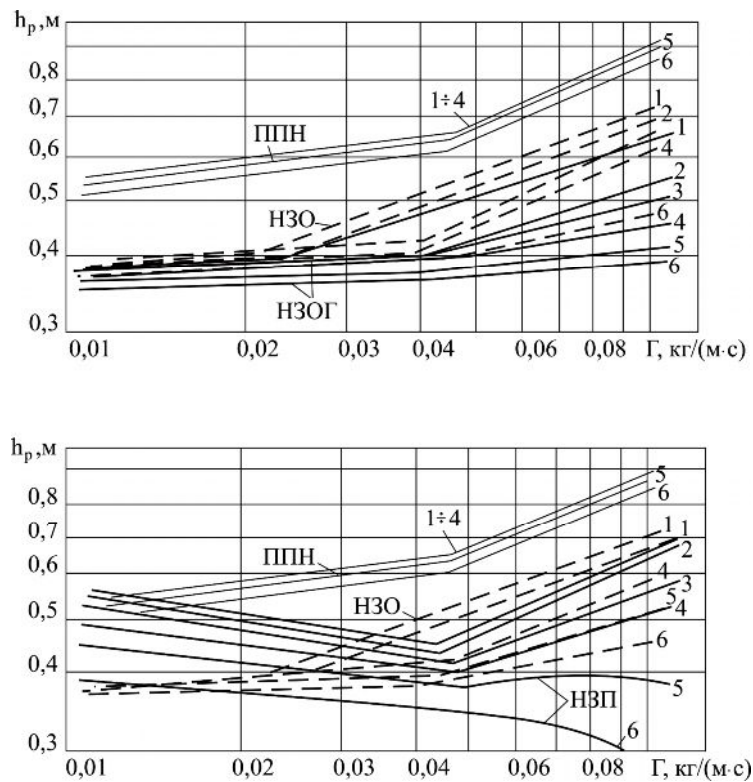


Рис. 5. Залежності  $h_p = f(\Gamma)$  при різних відносних швидкостях газу  $V_{г.в.}$ , м/с: 1 – 0,84; 2 – 1,58; 3 – 2,33; 4 – 3,11; 5 – 3,88; 6 – 4,66

відносної швидкості газового потоку на перемішування рідини всередині крапель під час їх формування і падіння. Значення коефіцієнтів  $A$ , показників степені  $m$  і  $n$  при числах Рейнольдса і межі застосування чисел Рейнольдса приведено в таблиці.

Таблиця

Значення коефіцієнтів  $A$  та показників степені  $m$  і  $n$  у рівнянні

$$h_p = AaRe_p^m Re_{г.в}^n Pr_p^{0,67} \text{ для досліджених насадок}$$

Насадка	Межі застосування		A	m	n	Орієнтовні значення $h_p$ , м
	$Re_p$	$Re_{г.в}$				
НЗО	23–150	1100–6150	1,48	0,067	-0,039	0,35–0,43
	150–420	1100–6150	1,18	0,36	-0,19	0,45–0,73
НЗОГ	45–150	1100–6150	1,75	0,046	-0,051	0,35–0,43
	150–420	1100–6150	3,19	0,20	-0,22	0,37–0,65
НЗП	45–180	1100–4500	6,70	-0,13	-0,097	0,41–0,55
	180–420	1100–4500	0,73	0,41	-0,17	0,43–0,68

Викривлені вниз ділянки ліній 5 і 6 для НЗП на рис. 5 відповідають утворенню емульгованого шару.

Досліджені насадки в цілому ефективніші за ППН, але мають і вищі гідравлічні опори. Найнижчі питомі гідравлічні опори (віднесені до  $h_p$ ), що наближаються до характерних для ППН значень, має НЗО. Опори НЗОГ і НЗП вищі. Питомі гідравлічні опори насадок мають менші значення при більших значеннях  $\Gamma$ , тобто енергія газового потоку ефективніше використовується при підвищених щільностях зрошення.

2. Значення часткових висот одиниці перенесення маси в газовій фазі  $h_y$  (абсорбція пари етанолу), що одержані графічним розкладанням  $h_{oy}$ , показано на рис. 6 і описано залежностями виду  $h_y = ARe_{г.в}^m$ , в яких розмірний коефіцієнт  $A$  для НЗО, НЗОГ і НЗП набуває значень 0,17; 0,19 і 0,16 м, а показник степеня  $m$  при числах Рейнольдса – відповідно 0,15; 0,13 і 0,14. Після опрацювання цих же величин у вигляді залежностей  $h_y = A'd_{ey} Re_{г.в}^m Pr_{г.в}^{0,67}$ , де  $d_{ey}$  – еквівалентний діаметр насадки, м,  $Pr_{г.в}$  – дифузійний критерій Прандтля для газової фази, для НЗО, НЗОГ і НЗП одержано значення безрозмірних коефіцієнтів  $A' = 8,65; 9,37$  і  $7,91$  та значення  $m$  відповідно 0,15; 0,13 і 0,14. Значення  $h_y$  одержано для турбулентного режиму руху газу, який реалізувався при  $Re_{г.в} \geq 2000$ .

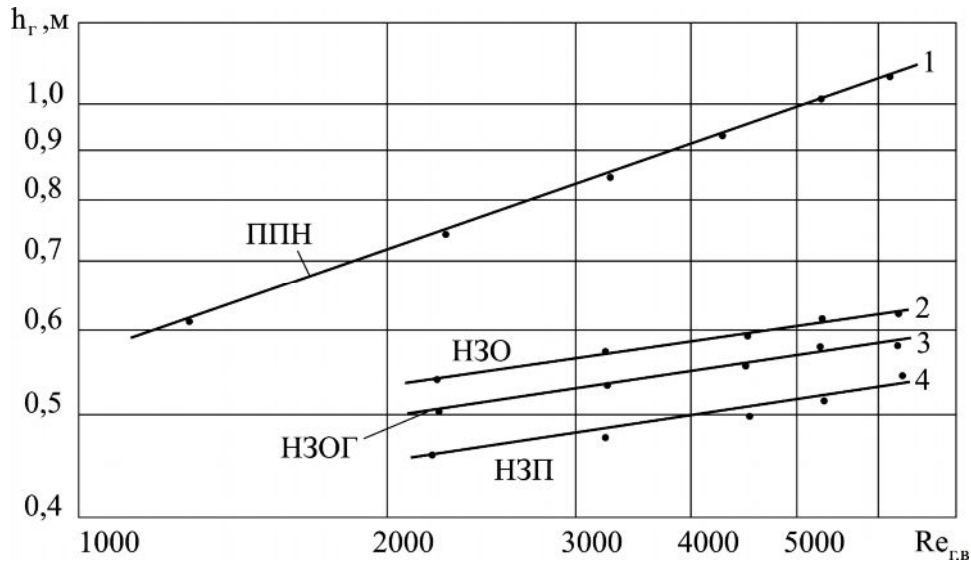


Рис. 6. Залежності  $h_y = f(Re_{г.в})$  для досліджених насадок

Питомі гідравлічні опори (віднесені до  $h_y$ ) ППН і НЗО мають близькі значення, питомі опори НЗОГ і НЗП – вищі, що свідчить про наявність некорисних втрат частини енергії газового потоку у двох останніх насадках.

3. Щоб точніше порівняти ефективності масообміну, проаналізовано відношення  $h_p$  і  $h_y$  ППН до цих же величин досліджених насадок.

Відношення  $h_p$  ППН до  $h_p$  НЗО і НЗОГ у межах величин  $\Gamma$  від 0,0113 до 0,030 кг/(м·с) мають подібний характер і постійні значення на рівні 1,46 і 1,49, які не залежать від витрат газу. Цей факт свідчить про те, що для ППН, НЗО і НЗОГ зростання щільності зрошення  $\Gamma$  в зазначених межах супроводжується однаковою інтенсивністю зростання масового потоку в рідкій фазі, незважаючи на те, що в ППН реалізується плівкова, а в НЗО і НЗОГ – краплинно-плівкова течія. Темп змінення значень  $h_p$  у разі використання ППН обумовлюється, в основному, збільшенням амплітуди хвиль, а в разі використання НЗО і НЗОГ – пропорційним підвищенням частоти відривання крапель. При  $\Gamma > 0,030$  кг/(м·с) автотельність відношень  $h_p$  втрачається. Найчутливіше рідина реагує на газовий потік у період змінення режиму течії окремими краплями на ланцюгову течію. При цьому внаслідок фронтального тиску газового потоку розміри звисаючих крапель збільшуються, краплі сплющуються та осцилюють, перемішування в краплях посилюється.

4. Особливістю досліджених насадок є значний вплив газового потоку на течію рідкої фази та інтенсифікацію в ній масообміну внаслідок вкладання енергії газу в рідкий потік при відносно невеликих швидкостях

газу через підвищену чутливість краплинної течії (порівняно з плівковою) до взаємодії з газом.

Найраціональніше гідравлічний опір використовується в насадці із зубчастими отворами (НЗО). В цій насадці некорисні втрати напору на розширення і стискання потоку і на тертя з незмоченою поверхнею зведено до мінімуму і майже вся енергія перепаду тиску газу витрачається за прямим призначенням на гідродинамічну взаємодію між фазами і, в кінцевому підсумку, на масообмін. НЗО рекомендується для апаратів з низьким гідравлічним опором і може замінити ППН.

Насадка із зубчастими отворами і гофрами (НЗОГ) має дещо вищу ефективність, ніж НЗО, але і питомі гідравлічні опори її вищі, тому її застосування пов'язане з підвищенням гідравлічного тиску порівняно з ППН у середньому в 1,5...2,5 рази. Ця насадка має стабільні характеристики масообміну в разі змінення витрат рідини і рекомендується до використання в апаратах з нестабільним подаванням зрошення.

Насадка із зубчастими пелюстками (НЗП) в цілому має значно вищі гідравлічні опори, ніж НЗО і НЗОГ, і відповідно вищу ефективність масообміну в газовій фазі. При щільності зрошення  $\Gamma \leq 0,040$  кг/(м·с) ефективність масообміну в рідкій фазі в НЗП нижча, ніж у НЗО і НЗОГ, а гідравлічний опір значно вищий. Тому для інтенсифікації масообміну в рідкій фазі НЗП доцільно застосовувати лише при великих витратах газу і підвищених щільностях зрошення, які відповідають переходу до режиму емульгування.

Високий гідравлічний опір НЗП не дає змоги використовувати її як регулярну насадку, виконану на основі ППН. За характеристиками масообміну НЗП близька до нерегулярних насадок, але вигідно відрізняється від них вищою пропускною спроможністю, значно нижчим гідравлічним опором і можливістю за допомогою змінення кута відгинання пелюсток створювати зони емульгування з підвищеною ефективністю масообміну в рідкій фазі. НЗП можна застосовувати замість нерегулярних насадок.

**У сьомому розділі** розглянуто конструювання регулярних насадок із зубчастими отворами.

1. Теоретично обґрунтовано основні геометричні розміри для розрахунку конструктивних елементів регулярних насадок, які, як з'ясувалось, визначаються капілярною сталюю. Для цього сформульовано і розв'язано п'ять задач, що відповідають типовим випадкам прояву капілярних сил в елементах контактних пристроїв.

**Задача 1.** Визначити максимальну висоту капілярного підняття рідини  $h$  по зануреній у рідину змочуваній нескінченно довгій плоскій пластині (рис. 7, а). Крайовий кут змочування поверхні пластини  $\Theta$ ,

коефіцієнт поверхневого натягу рідини  $\sigma$ , різниця густин рідини і газу  $\Delta\rho = \rho_p - \rho_r$ .

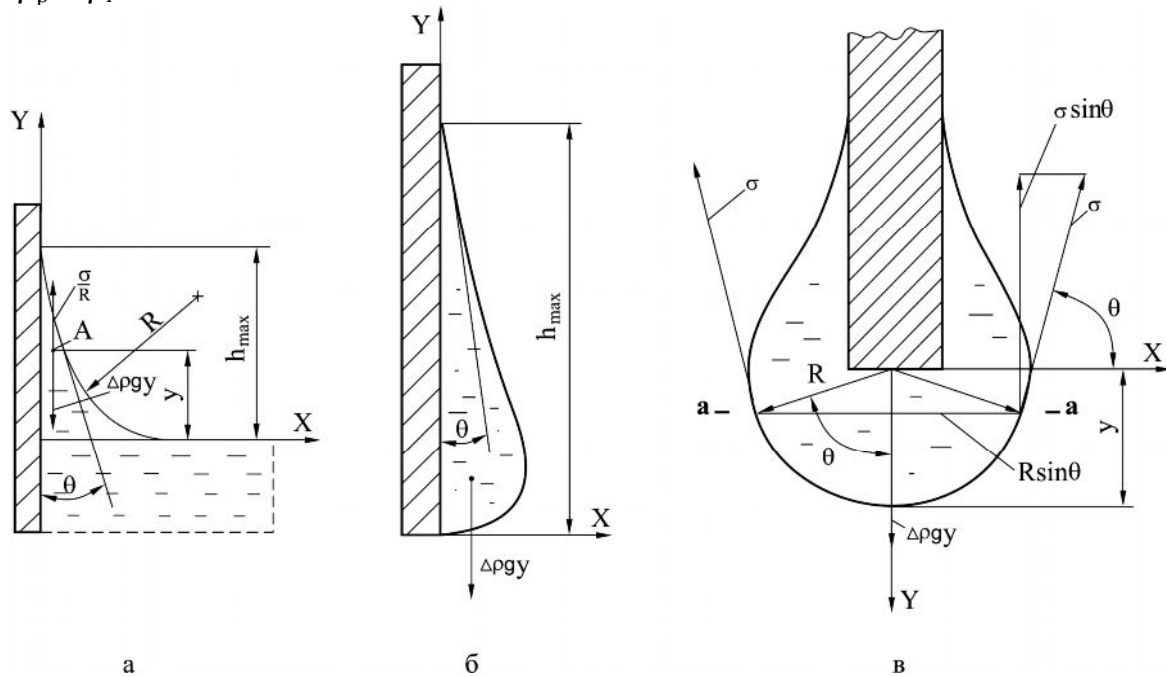


Рис. 7. Ілюстрації до задач:  
а – 1; б – 2; в – 4

**Розв'язання.** Візьмемо за вісь  $X$  пряму, що перпендикулярна до площини пластини і розміщена на горизонтальній поверхні рідини, а за вісь  $Y$  – вертикальну пряму на поверхні пластини. Хай  $y$  – поточна координата довільної точки  $A$ .

Розглянемо баланс сил у точці  $A$ . Гідростатичний тиск усередині рідини в точці  $A$  дорівнює  $\Delta\rho g y$ , де  $g$  – прискорення вільного падіння. Цей тиск зрівноважується лапласівським тиском, зумовленим кривизною поверхні радіусом  $R$  на рівні точки  $A$ , який дорівнює  $\sigma/R$ . Умова рівноваги  $\Delta\rho g y = \sigma/R$ .

За визначенням кривизни  $k = \frac{1}{R} = -\frac{d\theta}{ds}$ , де  $ds$  – елемент довжини дуги, що вважається додатним, якщо він проходить у напрямку знизу вгору, маємо  $\Delta\rho g y = -\frac{d\theta}{ds} y$ . Оскільки  $dy = ds \cos\theta$  і  $ds = dy / \cos\theta$ , то

$\Delta\rho g y = -y \frac{d\theta}{dy} \cos\theta$  або  $\Delta\rho g y dy = -\sigma \cos\theta d\theta$ , що після інтегрування дає

$$\Delta\rho g \frac{y^2}{2} = -\sigma \sin\theta + C.$$

За граничних умов  $y = 0$ ,  $\Theta = 90^\circ$  маємо  $C = \sigma$  і  $\text{Дсг} \frac{y^2}{2} = y(1 - \sin\Theta)$ ,

$$\text{звідки } y^2 = \frac{2y}{\text{Дсг}}(1 - \sin\Theta), \quad y = \sqrt{\frac{2y}{\text{Дсг}}(1 - \sin\Theta)}.$$

На поверхні стінки  $y = h$ , тоді  $h = \sqrt{\frac{2y}{\text{Дсг}}(1 - \sin\Theta)}$ .

Максимальна висота підняття рідини спостерігається, коли  $\Theta$  наближається до нуля, тобто  $h_{\max} = \sqrt{\frac{2y}{\text{Дсг}}}$ .

Цей вираз відповідає умові капілярного підняття рідини по вже змоченій поверхні, яка реалізується в процесі роботи контактних пристроїв масообмінних колон. Величину  $\sqrt{\frac{2y}{\text{Дсг}}}$ , що має розмірність довжини, в теорії капілярних явищ називають капілярною (або лапласівською) сталою і позначають літерою  $a$ .

Розв'язок цієї задачі збігається з уже відомим результатом, але одержання його простіше.

Чотири наступні задачі розв'язано нами вперше.

**Задача № 2.** Визначити висоту капілярного підняття рідини біля нижнього краю звисаючої зрошуваної плоскої пластини нескінченної довжини – рис. 7, б. Товщину плівки, що стікає, вважати нехтовно малою.

**Розв'язання.** У рівнянні рівноваги сил, записаному як  $\Delta\rho gy = \sigma k$ , виразимо кривизну  $k$  через відоме з диференціальної геометрії значення

$$k = \frac{1}{R} = \frac{y''}{(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}},$$

$$\text{тоді } \frac{\text{Дсг}y}{y} = k \text{ і } Ay = \frac{y''}{(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}}, \text{ де } A = \frac{\text{Дсг}}{y}.$$

$$\text{Оскільки } y' = \frac{dy}{dИ} = \text{ctgИ} \text{ і } \frac{d^2y}{dИ^2} = \frac{1}{\sin^2И}, \text{ а також } \sinИ = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{ctg}^2И}} \text{ і}$$

$$\sin^3И = \frac{1}{(1 + \text{ctg}^2И)^{\frac{3}{2}}}, \text{ то } \frac{\sin^3И}{y \cdot \sin^2И} = A, \text{ або } \frac{\sinИ}{y} = A.$$

$$\text{Виходячи із рівностей } \frac{dy}{dИ} = \text{ctgИ} = \frac{\cosИ}{\sinИ} \text{ і } \sinИ = \frac{\cosИ \cdot dИ}{dy},$$

$$\text{дістанемо } A = \frac{\cosИ \cdot dИ}{y dy} \text{ і } Ay dy = \cosИ \cdot dИ.$$

Після інтегрування останнього виразу одержимо  $A \frac{y^2}{2} = -\sin\Theta + C$ .

За граничних умов  $y = 0$ ,  $\Theta = 90^\circ$  маємо  $C = 1$  і  $A \frac{y^2}{2} = 1 - \sin\Theta$ , або

$$y^2 = 2 \frac{y}{D\sigma g} (1 - \sin\Theta) \text{ і } y = h = \sqrt{\frac{2\sigma}{\Delta\rho g} (1 - \sin\Theta)}.$$

Одержане рівняння збігається з рівнянням розв'язання задачі 1, тобто максимальна висота  $h_{\max}$  капілярного підняття рідини на плоскій звисаючій пластині дорівнює капілярній сталій  $h_{\max} = \sqrt{\frac{2y}{D\sigma g}} = a$ .

Висота капілярного підняття залишається постійною при зміні кута нахилу капіляра або пластини.

У **задачі № 3** визначено максимальну висоту звисання краплі з пластини нескінченної довжини на момент початку відривання, яка теж дорівнює  $a$ .

**Задача № 4.** Визначити максимальну висоту звисання  $u_{\max}$  і максимальний діаметр  $d_{\max}$  краплі на циліндричному стрижні (піпетці) у момент початку відривання (рис. 7, в).

Розв'язання. Щоб скласти баланс сил, які діють на звисаючу частину краплі в перерізі  $a-a$ , скористаємось рисунком. Сила  $F = 2\sigma \sin\Theta \pi x$ , що зумовлена поверхневим натягом, зрівноважується силою  $F = \Delta\rho g u \pi x^2$ , що зумовлена гідростатичним тиском, звідки  $2\sigma \sin\Theta = \Delta\rho g u x$ .

Позначивши  $\frac{2y}{D\sigma g} = a^2$ , отримаємо  $a^2 \sin\Theta = u x$ .

Узявши до уваги, що  $x \neq \text{tg}\Theta$ , дістанемо  $a^2 \sin\Theta = y^2 \text{tg}\Theta$ , звідки  $y = a \sqrt{\cos\Theta}$ .

Величина  $u$  приймає максимальне значення при  $\Theta = 90^\circ$ , тоді  $\cos\Theta = 1$  і  $u_{\max} = a$ , тобто максимальна висота звисання краплі у момент початку відривання від циліндричного стрижня (піпетки) дорівнює капілярній сталій і не залежить від розмірів (діаметра) стрижня. Незалежність  $h_{\max}$  від розмірів стрижня свідчить про те, що цей же розмір характерний і для крапель, які починають відриватися від стелі й від прямокутної пластини.

Максимальний діаметр краплі у горизонтальній площині визначимо з виразу  $a^2 \sin\Theta = u x$ . Враховуючи, що  $y = x \text{tg}\Theta$ , дістанемо  $a^2 \sin\Theta = x^2 \text{ctg}\Theta$ , або  $x^2 = a^2 \frac{\sin^2\Theta}{\cos\Theta}$ , звідки  $x = \frac{a \sin\Theta}{\sqrt{\cos\Theta}}$ .

Щоб обчислити максимальне значення  $x$ , дослідимо одержану функцію на екстремум.



Перша похідна  $a \frac{dx}{d\theta} = a \frac{d(\sin\theta \cdot \cos^2\theta)}{d\theta} = \cos\theta \cdot \cos^2\theta + \frac{1}{2} \cos^{-3}\theta \sin^2\theta = 0$ ,  
 або остаточно  $2\cos\theta + \sin\theta = 0$ .

Розділивши останній вираз на  $\sin\theta$ , дістанемо рівняння  $\operatorname{tg}\theta = -2\operatorname{ctg}\theta$ ,  
 справедливе у межах  $\frac{p}{2} \leq \theta \leq p$  і значенні  $\operatorname{tg}\theta = \sqrt{2}$ , тобто при  $\theta = 45^\circ$ . Це

значення  $\theta$  підставимо у вираз для  $x$ , тоді  $x_{\max} = \frac{a \sin 45^\circ}{\sqrt{\cos 145^\circ}} = \frac{a \cdot 0,7071}{\sqrt{0,8126}} \approx 0,637a$ ,

а максимальний горизонтальний діаметр краплі

$$d_{\max} = 2x_{\max} \approx 1,27a.$$

У задачі № 5 визначено максимальну висоту і діаметр газової бульбашки у момент початку її відривання від плоского барботера. З'ясувалось, що ця задача є оберненим варіантом задачі 4 про утворення краплі у газі, причому в однойменних середовищах форми бульбашки і краплі дзеркально відображаються. Максимальна висота газової бульбашки, як і краплі, у момент початку відривання від твердої поверхні дорівнює капілярній сталій, а максимальний діаметр перевищує капілярну сталу в 1,27 раза.

Одержані в розглянутих задачах співвідношення перевірено експериментально. Вони дають змогу обґрунтовано вибирати розміри елементів контактних пристроїв. Наприклад, якщо в тепломасообмінних апаратах треба забезпечити рівномірно розподілене стікання рідини із звисаючих листів або трубок, то зрізи їх виконують зубчастими; при цьому висота зубців має дещо перевищувати розмір  $a$ , а крок зубців –  $2a$ . Це саме співвідношення справедливе і для зубців в отворах перфорованих насадок, а також для отворів барботерів і ситчастих тарілок та для зубців на нижніх краях ковпачків ковпачкових тарілок.

Запропоновано класифікацію розроблених здобувачем регулярних насадок із зубчастими отворами. Згідно з цією класифікацією у підрозділах 2-5 розглянуто особливості конструювання насадок таких різновидів:

- 2 – з висіченими зубчастими отворами (типу НЗО);
- 3 – з просіченими зубчастими отворами і відігнутими пелюстками: вертикальними, нахиленими (типу НЗП), горизонтальними;
- 4 – комбінованих (типу НЗОГ);
- 5 – з конструктивними елементами для розподілу рідини.

Запропоновано спеціальну насадку для підвищення рівномірності розподілу рідини в широкому діапазоні щільностей зрошення (рис. 8). Насадка складається з вертикальних листів 1 однакової форми, які мають

по висоті три ділянки – верхню, середню і нижню з різними за призначенням і виконанням конструктивними елементами.

Верхня ділянка містить горизонтально спрямовані гофри 2 і 3, що виступають в різні сторони від площини листа на висоту, достатню для уловлювання струменів і крапель рідини, які вільно падають.

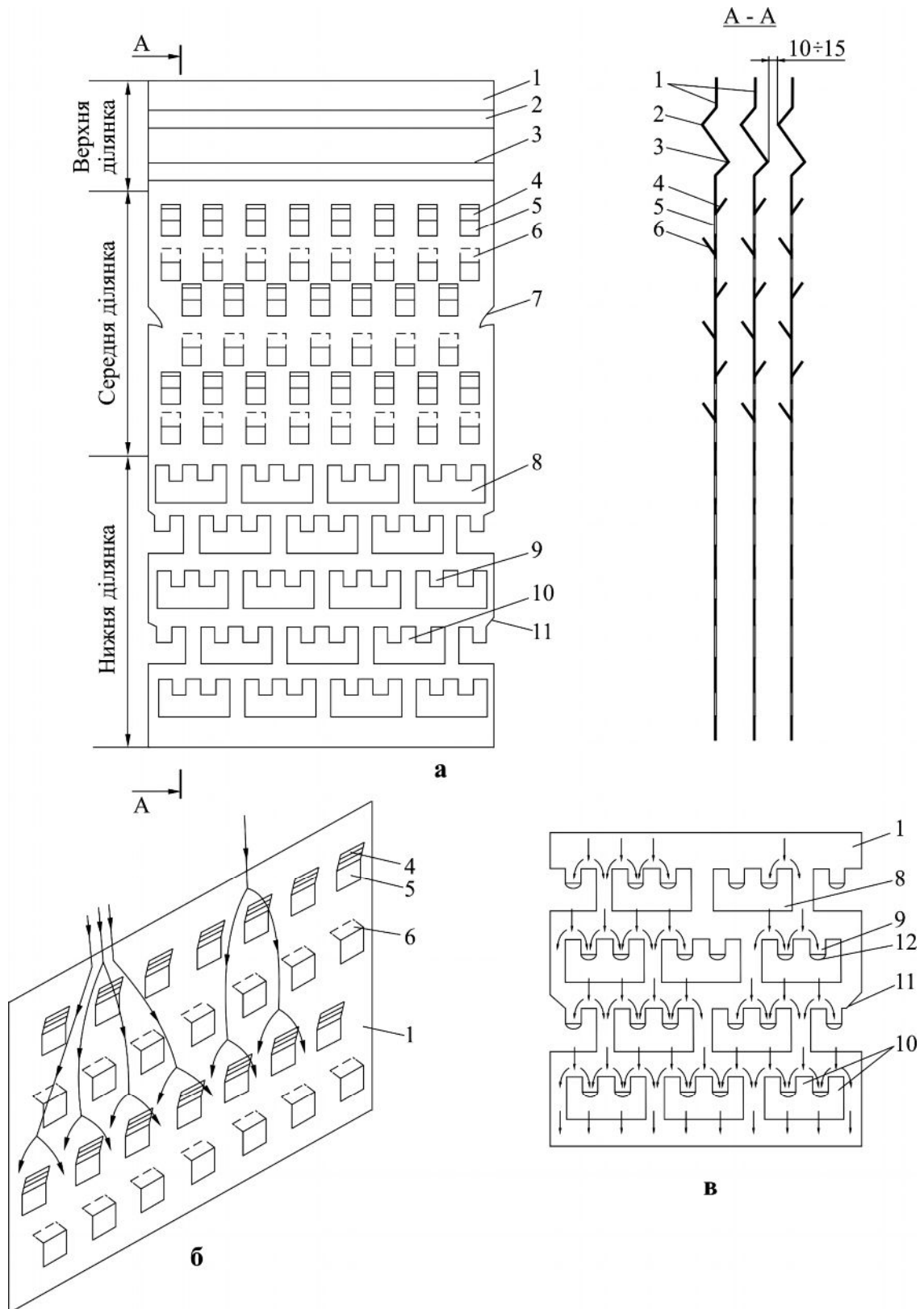


Рис. 8. Насадка для розподілу рідини:  
 а — загальний вигляд; б, в — схеми розподілу рідини на середній (б)  
 та нижній (в) ділянках листа насадки

Середня ділянка, що призначена для дробіння струменів на дрібніші, містить прямокутні просічені з трьох сторін отвори 5, по контурах верхніх країв яких відігнуто під кутом угору утворені з цих отворів пелюстки 4 і 6. Отвори розміщено горизонтальними рядами попарно в шаховому порядку. Відстань між отворами в горизонтальних рядах дорівнює ширині отворів. У кожному горизонтальному ряді отворів пелюстки відігнуто в одну сторону, в сусідніх рядах – у протилежну. Відігнуті вгору пелюстки не повинні виступати від площини листа більше ніж на половину зазору між листами. Схему розподілу струменів показано на рис. 8, б.

Нижня ділянка є фрагментом НЗО і містить розміщені горизонтальними рядами в шаховому порядку прямокутні отвори 8 із зубчастими верхніми краями. Ширина зубців 9 отворів приймається рівною ширині перетинок 10 між зубцями й одночасно рівною відстані між отворами по горизонталі. Кількість зубців, що звисають униз в отворах, має бути парною. У цьому разі зубці верхніх отворів розташовуються над перетинками зубців нижніх отворів і забезпечують найповніше розтікання рідини по ширині листів.

Розтікання рідини на нижній ділянці листа показано на рис. 8, в. Кожний показаний вертикальною стрілочкою мікропотік рідини, зустрівши на шляху своєї течії виступ 10 зубця 9, обтікає його з обох боків, розділяючись на два потоки. На зубцях утворюються краплі 12. Послідовне розділення потоків на кожному ряді отворів остаточно вирівнює розподіл рідини. Використання зубчастих отворів для рівномірного розподілу рідини ефективно лише після попереднього дробіння великих струменів на дрібніші, коли окремі потоки вже не мають великої сили інерції, яка перевищує капілярні сили.

Щоб запобігати стіканню рідини на краї листів, у них виконують вирізи 7 або косі зрізи 11.

Насадку призначено для підвищення рівномірності розподілу рідини після зрошувача та для вирівнювання порушеної по висоті апарата рівномірності течії рідини внаслідок гідродинамічної взаємодії потоків і недоліків конструкції та виготовлення.

Розподіл рідини у кожному окремому пакеті насадки вирівнюється лише в площині листів, тому, щоб розподілити рідину у взаємно перпендикулярних напрямках, слід встановлювати по два пакети один на другий, повернувши їх на  $90^\circ$ . Забезпечуючи ефективний розподіл рідини, насадка одночасно має задовільні масообмінні характеристики і невисокий гідравлічний опір.

У восьмому розділі подано інформацію про впровадження у виробництво апаратів з дослідженими регулярними насадками.

Насадку з зубчастими отворами без додаткових конструктивних елементів застосовано у вуглекислотному цеху Стецьківського спиртозаводу для промивання водою діоксиду вуглецю. Перед надходженням у промивач діоксид вуглецю вже пройшов обробку в спиртоуловлювачі з ковпачковими тарілками і містить незначну кількість домішок, тому для його очищення додатково турбулізувати газовий потік за допомогою гофрів не потрібно.

Насадку з зубчастими отворами і гофрами (НЗОГ) застосовано на Тхорівському спиртзаводі для уловлювання спиртової пари із газів бродіння та на Чернігівському м'ясокомбінаті для уловлювання газів, що виділяються із котлів для варки м'ясопродуктів.

Насадку з зубчастими пелюстками (НЗП), яка забезпечує найтісніше контактування фаз, використано на Соснівецькому цукровому заводі для модернізації лавера, призначеного для очищення сатураційного газу.

Технічну документацію на регулярні насадки використав Ніжинський механічний завод при виготовленні обладнання для спиртової та виноробної промисловості на загальну суму 10,8 тис. грн. Річний економічний ефект від впровадження модернізованого спиртоуловлювача на Тхорівському спиртозаводі потужністю 1,5 тис. дал/добу склав 6,9 тис. грн. Очікуваний економічний ефект від впровадження апаратів з регулярними насадками у спиртову галузь складає близько 0,5 млн. грн/рік.

Використання розроблених насадок в системах очищення газів сприяє вирішенню важливої соціальної проблеми захисту повітряного басейну від забруднень промисловими і вентиляційними викидами.

**Умовні позначення:**  $A$  – коефіцієнт;  $a$  – капілярна стала (константа Лапласа):  $a = \sqrt{2\gamma/(\Delta\rho g)}$ ;  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м;  $\Delta\rho = \rho_p - \rho_g$  – різниця густин рідини  $\rho_p$  і газу  $\rho_g$ , кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $d$  – діаметр, м;  $h_p, h_{oy}$  – загальні значення висот одиниці перенесення маси при масообміні у рідкій і переважно у газовій фазах, м;  $h_y$  – часткове значення висоти одиниці перенесення маси у газовій фазі, м;  $\ell$  – лінійний розмір, м;  $P$  – тиск, Па;  $R$  – радіус, м;  $v_{г.в}$  – швидкість газової фази відносно середньої швидкості рідини, м/с;  $y$  – поточна координата;  $\Gamma$  – лінійна щільність зрошення, кг/(м·с);  $\Theta$  – крайовий кут змочування, град;  $Pr_g$  – дифузійне число Прандтля для газової фази;  $Re_{г.в}$  – число Рейнольдса, розраховане за відносною швидкістю газової фази; ППН, НЗО, НЗОГ, НЗП – насадки, відповідно плоскопаралельна, із зубчастими отворами, із зубчастими отворами і гофрами, із зубчастими пелюстками.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі огляду літератури та теоретичного аналізу коливально - хвильових і поверхневих явищ у газорідних системах запропоновано і реалізовано новий метод інтенсифікації масообміну висіканням у листах регулярних насадок зубчастих отворів, за допомогою яких плівкова течія замінюється на краплинно-плівкову.

2. Виходячи з аналізу і систематизації відомих з гідромеханіки закономірностей поширення неперервних і динамічних хвиль за моделлю одновимірного гомогенного середовища, розроблено концепцію про доцільність використання динамічних хвиль та уповільнених стрибків ущільнення для інтенсифікації масообмінних процесів у газорідних системах. Розраховано зміну параметрів газорідної системи (швидкості, густини, тиску, температури) внаслідок уповільненого стрибка ущільнення. Показано, що неперервні й динамічні хвилі, та ефекти Марангоні, які утворюються внаслідок локальних нестационарностей масообміну, можуть змінювати гідродинамічні умови й інтенсивність масообміну, що знижує точність моделювання масообмінних процесів на гідродинамічних стендах.

3. Показано, що сили поверхневого натягу забезпечують зв'язок між фізико-хімічними, гідродинамічними і тепломасообмінними процесами на міжфазній поверхні та всередині рідкої фази, суттєво впливають на ефективність масообміну і можуть бути використані для інтенсифікації масообміну в газорідних системах, у яких визначальний геометричний розмір частинок дисперсної фази співмірний або менший від капілярної сталої.

4. Експериментально підтверджено зв'язок між характером течії рідини, гідравлічним опором та інтенсивністю масообміну в апаратах з насадками трьох типів.

5. Запропоновано класифікацію та встановлено межі існування таких режимів утворення крапель при стіканні рідини з зубців: рівноважного, вільного, резонансного, ланцюгового, струменевого. Для однофазної течії рідини в досліджених насадках встановлено існування та межі реалізації не описаних раніше режимів краплинно-плівкової течії: з ініційованою течією крапель, з ініційованою течією крапель і ділянками ланцюгової течії, окремими струмінцями, широкими струменями.

6. В умовах краплинно-плівкової течії протитечійний газовий потік взаємодіє з рідиною інтенсивніше, ніж в умовах плівкової течії. Запропоновано класифікацію інтенсивностей взаємодії фаз: слабка, відчутна, інтенсивна, сильна. В зонах інтенсивної і сильної взаємодії фаз

встановлено існування нових режимів краплинно-плівкової течії: з рівномірною, нерівномірною і нестійкою течіями крапель.

7. Аналізом кривих відгуку на імпульсне введення індикатора встановлено, що за відношенням максимальної і середньої швидкостей краплинно-плівкова течія належить до перехідної зони між ламінарним і турбулентним режимами.

8. Встановлено, що насадка із зубчастими отворами без будь-яких додаткових конструктивних елементів є найдосконалішою щодо використання енергії газового потоку для інтенсифікації масообміну і ефективнішою за плоскопаралельну насадку.

9. Насадка із зубчастими отворами і гофрама має вищий питомий гідравлічний опір, ніж насадка без гофрів. Її можна рекомендувати для процесів з переважаючим опором масопередачі у газовій фазі та для апаратів з нестабільним поданням зрошення.

10. Насадку із зубчастими пелюстками не доцільно використовувати в апаратах з обмеженими перепадами тиску, але вона може замінити нерегулярні насадки, забезпечуючи при цьому значно нижчий гідравлічний опір і вищу пропускну спроможність.

11. Розв'язанням рівнянь балансу об'ємних і поверхневих сил встановлено капілярні співвідношення та визначальний геометричний розмір для розрахунку конструктивних елементів насадок. Цей розмір дорівнює капілярній сталій. Розглянуто особливості конструювання насадок досліджених різновидів.

12. На розроблені конструкції одержано 17 авторських свідоцтв СРСР та 16 патентів України. Апарати з дослідженими насадками впроваджено у виробництво на чотирьох підприємствах харчової промисловості. Технічну документацію на насадки використано механічним заводом при виготовленні обладнання для спиртової та виноробної промисловості.

Результати досліджень відображено в підручнику і двох навчальних посібниках з процесів і апаратів харчових виробництв.

## **ПЕРЕЛІК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Монографія**

1. Марценюк А.С., Стабников В.Н. Плёночные тепло- и массообменные аппараты в пищевой промышленности. – М.: Лёгкая и пищ. пром-ть, 1981. – 160 с.

Особистий внесок: узагальнення і викладення матеріалу, який відноситься до масообміну, будови і роботи регулярних насадок і плівкових масообмінних апаратів та методів підвищення їх ефективності.

### **Підручник**

2. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник / За ред. проф. І.Ф.Малежика. – К.: НУХТ, 2003. – 400 с. (Здобувачем написано розділ “Сорбція”, с. 267–297, та у співавторстві з О.Т. Лісовенко розділ “Перемішування”, с. 119–139).

Особистий внесок у розділ “Перемішування”: узагальнення питань перемішування рідких середовищ помірної в’язкості та сипких матеріалів, введення поняття про масштабний рівень перемішування, яке використане в розробленій класифікації механічних мішалок, а в дисертаційній роботі - в класифікації методів застосування коливань для інтенсифікації процесів абсорбції.

### **Навчальні посібники**

3. Проектирование процессов и аппаратов пищевых производств / Под. ред. В.Н. Стабникова. – К.: Вища шк., 1982. – 199 с. (Здобувачем написано розділ “ Абсорбция”, с. 146–166).

4. Проектиране на апарати и уредби за хранително-вкусовата и биотехнологичната промишленост. (Ръководство) / Под общата ред. на проф.

В. Стабников и доц. К. Коларов. / А. Николаев, А. Марценюк, В. Заднепрный, П. Лобода, П. Немирович, П. Цыганков, Д. Дамянов, Д. Желязков, К. Динков, К. Коларов, М. Керезиева-Ракова, Н. Менков, К. Паскалев. – Пловдив, / Акад. изд. при ВСИ, 1998. – 353 с. (Здобувачем написано розділ “ Абсорбционни уредби”, с. 245–269).

### **Брошура**

5. Марценюк А.С. Разработка и применение регулярных насадок в противоточных плёночных массообменных аппаратах. – М.: ЦНИИТЭИпищепром, 1975. – 32 с.

### **Статті в фахових наукових журналах і збірниках наукових праць**

6. Стабников В.Н., Марценюк А.С. Конструирование регулярных перфорированных насадок для пленочных массообменных аппаратов // Хим. машиностроение. Республ. межвед. научно-технич. сб. – 1975. – Вып. 21. – С. 13–20.

Особистий внесок: концепція моделі інтенсифікації масообміну за рахунок зменшення товщини пристінного пограншару під час утворення крапель та обтікання рідиною турбулізуючих елементів насадки.



7. Марценюк А.С., Стабников В.Н. О гидравлических сопротивлениях и массообмене в колонне с регулярной пластинчатой насадкой // Изв. вузов СССР. Пищ. технология. – 1976. – №5. – С. 101–105.

Особистий внесок: експериментальні дослідження та їх обробка, порівняння робочих характеристик насадок.

8. Марценюк А.С., Стабников В.Н. Исследование массообмена в газовой фазе на регулярной насадке с зубчатыми отверстиями // Пищ. пром-сть. Респ. межвед. научно-техн. сб. – К.: Техніка. – 1979. – Вып. 25. – С. 17–20.

Особистий внесок: експериментальні дослідження, обробка та інтерпретація їх результатів.

9. Марценюк А.С., Стабников В.Н. Рабочие характеристики насадки с зубчатыми отверстиями // Пятая всесоюз. конф. по теории и практике ректификации. – Северодонецк. – 1984. – Ч. 2. – С. 117–119.

Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень, узагальнення результатів.

10. Марценюк А.С. Об интенсификации массоотдачи в жидкой фазе при ламинарном гравитационном плёночном течении // Пищ. пром-сть. Республ. межвед. научно-техн. сб. — К.: Техніка. – 1986. – Вып. 32. – С. 18–22.

11. Марценюк А.С. Регулярные перфорированные насадки и их использование в спиртовой промышленности // Изв. вузов СССР. Пищ. технология. – 1986. – № 6. – С. 73–77.

12. Марценюк А.С., Гусейнов Р.Н. Определение размеров зубьев в отверстиях листовых насадок // Пищ. пром-сть. Респ. межвед. научно-техн. сб. – К. – 1987. Вып. 33. – С. 31–34.

Особистий внесок: розроблення концепції застосування капілярної сталої для розрахунку розмірів зубчастих отворів перфорованих регулярних насадок.

13. Марценюк А.С., Мельник Л.Н. Регенерация этанола в производстве пектина // Технология и оборудование пищ. пром-сти и пищ. машиностроение. Сб. науч. тр. – Краснодар: Политехнич. ин-т. – 1988. – С. 178–185.

Особистий внесок: обґрунтування доцільності застосування колон з регулярними насадками для регенерації еталону у виробництві пектину.

14. Мельник Л.Н., Малежик И.Ф., Марценюк А.С., Немирович П.М., Ковальчук В.П. Эффективность клапанных тарелок при ректификации этанола // Пищ. пром-сть. – 1988. – № 1. – С. 46–49.

Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень, узагальнення результатів, порівняння характеристик колон з регулярними насадками і тарілчастих, підготовка до друку.

15. Марценюк А.С., Мельник Л.Н., Малезик И.Ф. Влияние разрежения на эффективность работы колонн БРУ // Пищ. пром-сть. Респ. межвед. науч.-техн. сб. – К.: Урожай. – 1989. – Вып. 35. – С. 92–97.

Особистий внесок: узагальнення результатів експериментальних досліджень, обґрунтування концепції доцільності застосування регулярних насадок у колонах брагоректифікаційних установок, які працюють при розрідженні.

16. Марценюк А.С., Гусейнов Р.Н. Интенсификация процесса массообмена в колоннах с регулярными насадками // Тепло- и массообменные процессы в пищ. пром-сти: Тематич. сб. науч. тр.; Под ред. П.С. Цыганкова. – К.: УМК ВО. – 1990. – С. 151–161.

Особистий внесок: обґрунтування ідеї інтенсифікації процесу масообміну за допомогою організації краплинно-плівкової течії рідини перфоруванням листів насадок зубчастими отворами, пояснення механізму впливу крапель на інтенсивність масообміну, узагальнення результатів експериментальних досліджень.

17. Марценюк А.С. Регулярные насадки с зубчатыми просечными элементами // Пищ. пром-сть. Респ. межвед. тематический науч. сб. – К.: Урожай. – 1991. – №37. – С. 75–79.

18. Марценюк О.С. Рівномірне зрошення колон із регулярними насадками // Харч. пром-сть. Міжвід. тематичний наук. зб. – К.: Урожай. – 1996. – Вип. 42. – С. 54–57.

19. Марценюк О.С. Режимы краплинно-плівкової течії рідини по регулярній насадці із зубчастими отворами // Наукові праці УДУХТ: У 2 ч. – К.: УДУХТ. – 1998. – № 4. – ч. 2. – С. 36–38.

20. Марценюк О.С., Овчарук В.О., Дзис А.С. Аналіз процесів деформації і дробіння крапель в апаратах харчових виробництв // Харч. пром-сть. Міжвід. тематичний наук. зб. – К.: УДУХТ. – 1998. – № 43–44. – С. 92–101.

Особистий внесок: узагальнення ролі сил поверхневого натягу в процесах деформації та дробіння крапель; діаграма стану крапель у повітряному потоці.

21. Марценюк О.С. Гідравлічні опори і масообмін у рідкій фазі в апаратах з регулярними насадками, перфорованими зубчастими отворами // Харч. пром-сть. Міжвід. тематичний наук. зб. – К.: УДУХТ. – 2000. – № 45. – С. 211–217.

22. Марценюк О.С., Дубінін О.О., Тахістова Г.О. Коливання в гетерогенних системах // Наук. пр. НУХТ. – К.: НУХТ. – 2002. – №12 (Додаток). – 43 с.

Особистий внесок: концепція про те, що локальні нестационарності процесів масообміну можуть бути причиною утворення хвиль, які, в свою

чергу, впливають на інтенсивність масообміну у віддалених зонах системи; постановка, сумісне розв'язання задач та інтерпретація результатів розгляду закономірностей поширення і взаємодії неперервних і динамічних хвиль; ідея про доцільність використання уповільнених стрибків ущільнення для інтенсифікації масообміну в газорідних апаратах.

23. Марценюк О.С., Мельник Л.М., Копиленко А.В. Масообмін у газовій фазі в апаратах із регулярними насадками, що перфоровані зубчастими отворами // *Наук. пр. НУХТ.* – К.: НУХТ. – 2002. – №12. – С. 67–70.

Особистий внесок: планування та проведення експериментальних досліджень, узагальнення результатів.

24. Марценюк О.С., Копиленко А.В., Мельник Л.М., Жестерева Н.А. Інтенсифікація процесу абсорбції за допомогою коливань різного масштабного рівня // *Наук. пр. НУХТ.* – К.: НУХТ. – 2002. – №12. – С. 70–72.

Особистий внесок: класифікація методів застосування коливань для інтенсифікації процесів абсорбції.

25. Марценюк О.С., Дубінін О.О., Тахістова Г.О. Формування псевдооднорідних потоків двофазних систем // *Вісник Харк. держ. техн. ун-ту сільського госп.* – Вип. 16. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. – Х.: Мін. аграр. політики України. – 2003. – С. 78–83.

Особистий внесок: пояснення явища захлинання тепломасообмінних апаратів як результату припинення поширення неперервних хвиль у псевдооднорідній газорідній системі внаслідок збільшення об'ємного газовмісту системи до 50 %.

26. Дубінін О.О., Переяславцев О.М., Марценюк О.С. Визначення геометричної форми пружно-пластичного середовища на горизонтальній поверхні // *Наук. пр. НУХТ.* – К.: НУХТ. – 2003. – № 14. – С. 27–29.

Особистий внесок: постановка задачі визначення форми краплі, розміщеної на горизонтальній поверхні, розширення задачі на пружно-пластичні середовища, узагальнення результатів.

27. Марценюк О.С., Дубінін О.О., Тахістова Г.О. Капілярні співвідношення для елементів контактних пристроїв масообмінних апаратів // *Харч. пром-сть.* – К.: НУХТ. – 2004. – № 3. – С. 112–118.

Особистий внесок: формулювання задачі, складання балансових рівнянь, участь у розв'язанні рівнянь, інтерпретація і застосування отриманих результатів.

### **Авторські свідоцтва та патенти**

28. А.с. 440147 СССР, МКИ В 01 Д 53/20. Регулярная пластинчатая насадка / Марценюк А.С. – Оpubл. 25.08.74, Бюл. № 31.

29. А.с. 513072 СССР, МКИ С 11 В 3/14. Аппарат для дезодорации жиров и масел / Марценюк А.С., Заднепрный В.А. – Оpubл. 05.05.76, Бюл. № 17.

Особистий внесок: розроблення апарата на основі використання щілинної насадки для роботи у барботажному режимі, п.п. 1, 2 формули винаходу.

30. А.с. 1291191 А1 СССР, МКИ В 01 Д 53/20. Регулярная насадка / Марценюк А.С. – Оpubл. 23.02.87, Бюл. № 7.

31. А.с. 1311767 А1 СССР, МКИ В 01 Д 53/20. Регулярная насадка для теплообменных процессов / Марценюк А.С. – Оpubл. 23.05.87, Бюл. № 19.

32. А.С. 1318269 А1 СССР, МКИ В 01 Д 53/20. Регулярная насадка для теплообменных аппаратов / Марценюк А.С., Гусейнов Р.Н. – Оpubл. 23.06.87, Бюл. № 23.

Особистий внесок: ідея відгинання зубчастих просічних елементів по вертикальній лінії, розроблення конструкції, п. 1 формули винаходу.

33. А.с. 1327939 А1 СССР, МКИ В 01 Д 53/20. Регулярная насадка для теплообменных аппаратов с пленочно-капельным течением дисперсной фазы / Марценюк А.С. – Оpubл. 07.08.87, Бюл. № 29.

34. А.с. 1369775 А1 СССР, МКИ В 01 Д 53/20. Регулярная насадка / Марценюк А.С. – Оpubл. 30.01.88, Бюл. № 4.

35. А.с. 1443949 А1 СССР, МКИ В 01 Д 53/20, 11/04. Регулярная насадка с пленочно-капельным течением дисперсной фазы / Марценюк А.С. – Оpubл. 15.12.88, Бюл. № 46.

36. А.с. 1554960 А1 СССР, МКИ В 01 J 19/30. Регулярная насадка для теплообменных процессов / Марценюк А.С. – Оpubл. 07.04.90, Бюл. № 13.

37. А.с. 1634703 А1 СССР, МКИ С 12 F 1/06, С 08 В 37/06. Способ регенерации этанола / Марценюк А.С., Малежик И.Ф., Мельник Л.Н., Сергеев А.Д., Немирович П.М. – Оpubл. 15.03.91, Бюл. № 10.

Особистий внесок: ідея застосування регулярних насадок із низьким гідравлічним опором для забезпечення можливості повторного використання теплоти нагрівної пари в процесі регенерації етанолу, розроблення способу.

38. А.с. 1646593 А1 СССР, МКИ В 01 J 19/32. Регулярная насадка / Марценюк А.С. – Оpubл. 07.05.91, Бюл. № 17.

39. А.с. 1666529 А1 СССР, МКИ С 12 F 1/00. Способ регенерации этанола из спирто-водной суспензии, полученной в производстве пектина /

Мельник Л.Н., Немирович П.М., Марценюк А.С., Малежик И.Ф., Сергеев А.Д., – Оpubл. 30.07.91, Бюл. № 28.

Особистий внесок: ідея та участь у розробленні.

40. А.с. 1685502 А1 СССР, МКИ В 01 J 19/32. Регулярная насадка для теплообменных процессов / Марценюк А.С., Гусейнов Р.Н. – Оpubл. 23.10.91, Бюл. № 39.

Особистий внесок: ідея створення насадки з однаковими умовами контактування фаз на вертикальних ділянках листів і на просічних елементах, участь у розробленні.

41. А.с. 1685503 А1 СССР, МКИ В 01 J 19/32. Регулярная насадка для теплообменных процессов / Марценюк А.С., Гусейнов Р.Н., Антонов А.А. – Оpubл. 23.10.91, Бюл. № 39.

Особистий внесок: ідея застосування зубців профільної форми, участь у розробленні.

42. А.с. 1761251 А1 СССР, МКИ В 01 J 19/32. Регулярная насадка для теплообменных аппаратов / Марценюк А.С. – Оpubл. 15.09.92, Бюл. № 34.

43. А.с. 1777950 А1 СССР, МКИ В 01 J 19/32. Распределительная регулярная насадка / Марценюк А.С. – Оpubл. 30.11.92, Бюл. № 44.

44. А.с. 1785729 А1 СССР, МКИ В 01 J 19/32. Регулярная насадка для теплообменных процессов / Марценюк А.С., Гусейнов Р.Н., Барицкая И.А. – Оpubл. 07.01.93, Бюл. № 1.

Особистий внесок: ідея виконання зубчастих отворів на всю ширину листів насадки, розроблення конструкції.

45. Патент України 32493, МПК 4 В 01 Д 53/20. Регулярна насадка для теплообмінних апаратів з плівково-краплинною течією дисперсної фази / Марценюк О.С. – Оpubл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

46. Патент України 32494, МПК 4 В 01 Д 53/20. Регулярна насадка для теплообмінних процесів / Марценюк О.С. – Оpubл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

47. Патент України 32495, МПК 4 В 01 Д 53/20. Регулярна насадка / Марценюк О.С. – Оpubл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

48. Патент України 32496, МПК 4 В 01 Д 53/20. Регулярна насадка для теплообмінних апаратів / Марценюк О.С., Гусейнов Р.Н. – Оpubл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

Особистий внесок: ідея та розроблення конструкції, п. 1 формули винаходу.

49. Патент України 32497, МПК 4 В 01 Д 53/20. Регулярна насадка / Марценюк О.С. – Оpubл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

50. Патент України 32498, МПК 4 В 01 Д 53/20, В 01 Д 11/04. Регулярна насадка з плівково-краплинною течією дисперсної фази / Марценюк О.С. – Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

51. Патент України 32499, МПК 5 В 01 J 19/30. Регулярна насадка для тепломасообмінних процесів / Марценюк О.С. – Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

52. Патент України 32500, МПК 5 С 12 F 1/06, С 08 В 37/06. Спосіб регенерації етанолу / Марценюк О.С., Малежик І.Ф., Мельник Л.М., Сергєєв А.Д., Немирович П.М. – Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

Особистий внесок: ідея повторного використання теплоти нагрівної пари в процесі регенерації етанолу за допомогою застосування регулярних насадок із низьким гідравлічним опором, розроблення способу.

53. Патент України 32501, МПК 5 В 01 J 19/32. Регулярна насадка / Марценюк О.С. – Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

54. Патент України 32502, МПК 5 С 12 F 1/00. Спосіб регенерації етанолу з спирто-водної суспензії, одержаної у виробництві пектину / Мельник Л.М., Немирович П.М., Марценюк О.С., Малежик І.Ф., Сергєєв А.Д. – Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

Особистий внесок: ідея та участь у розробленні.

55. Патент України 32503, МПК 5 В 01 J 19/32. Регулярна насадка для тепломасообмінних апаратів / Марценюк О.С., Гусейнов Р.Н. – Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

Особистий внесок: ідея відгинання зубчастих просічних елементів по вертикальній лінії, розроблення конструкції, п. 1 формули винаходу.

56. Патент України 32504, МПК 5 В 01 J 19/32. Регулярна насадка для тепломасообмінних процесів / Марценюк О.С., Гусейнов Р.Н., Антонов О.А. – Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

Особистий внесок: ідея застосування зубців профільної форми, участь у розробленні.

57. Патент України 32505, МПК 5 В 01 J 19/32. Регулярна насадка для тепломасообмінних апаратів / Марценюк О.С. – Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

58. Патент України 32506, МПК 5 В 01 J 19/32. Регулярна насадка для тепломасообмінних процесів / Марценюк О.С., Гусейнов Р.Н., Барицька І.А. – Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

Особистий внесок: ідея та розроблення конструкції.

59. Патент України 32507, МПК 5 В 01 J 19/32. Розподільна регулярна насадка / Марценюк О.С. – Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

60. Деклараційний патент України 38456 А, МПК 7 А 21С1/00. Спосіб механічної обробки суміші компонентів для виготовлення кондитерських

емульсій / Лісовенко О.Т., Дзіс А.С., Малежик І.Ф., Литовченко І.М., Марценюк О.С. – Опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4.

Особистий внесок: проведення експериментів з диспергування на краплі суміші компонентів, встановлення оптимальних значень відцентрового числа Фруда, участь у розробленні.

### Тези доповідей на наукових конференціях

61. Марценюк А.С., Гусейнов Р.Н. Реализация режима прерывистого течения жидкости по вертикальным поверхностям регулярных насадок // VII респ. конф. «Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств» Тезисы докл. – Львов: МВССО УССР. – 1988. – Ч. 1, С. 34–35.

Особистий внесок: обґрунтування положення про зв'язок капілярної сталої з розмірами зубчастих отворів.

62. Стабников В.Н., Марценюк А.С., Мельник Л.Н. Некоторые эксплуатационные особенности колонн для ректификации этанола при разрежении // Современные машины и аппараты хим. производств. Химтехника-88. Тезисы докл. Всесоюз. конф. – Чимкент. – 1988. – Ч. 2. – С. 249–250.

Особистий внесок: концепція застосування регулярних насадок для ректифікації етанолу при розрідженні.

63. Марценюк А.С., Гусейнов Р.Н. Экономия энергетических ресурсов в аппаратах с регулярными насадками // Тезисы докл. респ. науч.-техн. конф. «Интенсификация технологий и совершенствование оборудования перерабатывающих отраслей АПК». – К. – 1989. – С. 231.

Особистий внесок: обґрунтування основних положень, пояснення механізму підвищення ефективності масообміну.

64. Мельник Л.Н., Марценюк А.С., Малежик И.Ф. Влияние тепловых параметров регенерации этанола на пищевую ценность продуктов питания // Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания. Тезисы докл. Всесоюз. науч. конф. – Харьков. – 1990. – С. 100.

Особистий внесок: концепція використання регулярних насадок в ректифікаційних колонах з метою зниження тривалості теплової дії на етанол.

65. Гусейнов Р.Н., Марценюк А.С. Преимущества массообменных аппаратов с низким гидравлическим сопротивлением // Тезисы докл. Респ. науч.-техн. конф. «Разработка и внедрение высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, оборудования и новых видов пищевых продуктов в пищевую и перерабатывающие отрасли АПК». – К.: КТИПП. – 1991. – С. 627.

Особистий внесок: обґрунтування положення про доцільність застосування в спиртоуловлювачі регулярних насадок.

66. Марценюк А.С., Гусейнов Р.Н., Стабников В.Н. Перфорированные регулярные насадки с просечными элементами // Тезисы докл. VI Всесоюз. конф. по теории и практике ректификации. – Северодонецк. – 1991. – С. 159–160.

Особистий внесок: ідея та розроблення регулярних насадок із зубчастими пелюстками (НЗП).

67. Марценюк О.С., Малежик І.Ф., Мельник Л.М. Використання розрідження в регенераційних установках пектинового виробництва // Тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. “Розробка та впровадження нових технологій і обладнання у харчову та переробні галузі АПК”. – К.: КТІХП. – 1993. – С. 447–448.

Особистий внесок: розроблення технологічної схеми регенераційної установки з використанням у колонах регулярної насадки.

68. Гусейнов Р.Н., Марценюк О.С. Дослідження масообміну в апаратах з регулярними насадками // Тези доп. Всеукр. наук.-техн. конф. “Розробка та впровадження прогресивних технологій та обладнання у харчову та переробну промисловість”. – К.: УДУХТ. – 1995. – С. 321.

Особистий внесок: розроблення різновидів насадок, експериментальні дослідження.

69. Марценюк О.С., Гусейнов Р.Н. Регулярні насадки з відігнутими зубчастими просічними елементами // Тези доп. IX Міжнар. конф. Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв. – Одеса. – 1996. – Ч. 2, 3, С. 40.

Особистий внесок: ідея та розроблення насадок із зубчастими пелюстками.

70. Марценюк О.С. Особливості конструювання регулярної насадки із зубчастими отворами і гофрами // Міжнар. наук.-техн. конф. “Розроблення та впровадження прогресивних ресурсоощадних технологій та обладнання в харчову та переробну промисловість”. Тези доп. – К.: УДУХТ. – 1997. – С. 99.

71. Марценюк О.С. Поверхностные явления в аппаратах с регулярной насадкой // Междунар. науч.-техн. конф. «Техника и технология пищевых производств». Тезисы докл. – Могилев. – 1998. – С. 159–160.

72. Марценюк О.С. Інтенсивність перемішування і масовіддача у рідкій фазі в апаратах з регулярною перфорованою насадкою // Тези доп. X Міжнар. конф. “Вдосконалення процесів та апаратів хімічних та харчових виробництв” (JCSSE-99). – Львів. – 1999. – С. 48.

73. Марценюк О.С. Доцільне використання енергії газового потоку в регулярних насадках із зубчастими отворами // Шоста міжнар. наук.-техн.



конф. “Проблеми та перспективи створення і впровадження нових ресурсо- та енергоощадних технологій, обладнання в галузях харчової та переробної промисловості.” Матеріали конф. – К.: УДУХТ. – 2000. – Ч. 2, С. 110.

74. Марценюк О.С. Вплив поверхневих сил на процеси масообміну в насадкових апаратах // Харчова пром-сть. Додаток до журналу № 3. Оpubліковано за матеріалами Міжнар. наук.-техн. конф. “Розроблення та виробництво продуктів функціонального харчування, інноваційні технології та конструювання обладнання для перероблення сільгоспсировини, культура харчування населення України”. – К.: НУХТ. – 2004. – С. 123–124.