

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,  
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Марван Ель Дассукі



УДК 661.321.3

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ТЕПЛО- МАСООБМІННИХ ТА ГІДРОДИНАМІЧНИХ  
ПРОЦЕСІВ КОНТАКТНОГО ВИПАРЮВАННЯ ДИСТИЛЕРНОЇ РІДИНИ У  
СОДОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Харків – 2012**

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Харків.

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор

**Цейтлін Мусій Абрамович**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри хімічної техніки та промислової екології

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор

**Семенишин Євген Михайлович**, Національний технічний університет «Львівська політехніка», м. Львів, професор кафедри хімічної інженерії та промислової екології

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Фрумін Віталій Мусійович**, Державний науково-дослідний і проектний інститут основної хімії Міністерства промислової політики України, м. Харків завідувач лабораторії тепломасообмінної апаратури

Захист відбудеться: «\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 р. о \_\_ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.05 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розіслано «\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Тимченко В. К

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Хімічні виробництва скидають великі кількості рідких стоків з температурою, яка часто досить значно перевищує температуру навколишнього середовища. Використання теплоти, що губиться із цими стоками, не завжди можливе, тому що звичайні поверхневі теплообмінники можуть забиватися відкладеннями солей, та й не завжди у виробництві є споживач низькопотенційної теплоти. Зокрема, стік содового виробництва – дистилерна рідина (ДР) скидається в накопичувачі з температурою, що перевищує 95 °С. ДР являє собою розчин, основні компоненти якого хлорид натрію (5-6 %) і хлорид кальцію (10-12 %). У ній також присутні тверді речовини (40-60 г/л), невеликі кількості аміаку й розчиненого сульфату кальцію. Остання обставина є основною перешкодою для використання теплоти ДР, тому що при її охолодженні на поверхнях теплообмінників утворюються щільні відкладення гіпсу. Ця ж обставина (відкладення гіпсу) сильно ускладнює подальшу переробку ДР шляхом випарювання з одержанням товарного продукту – хлориду кальцію.

Альтернативою концентруванню ДР у традиційних випарних апаратах може бути її випарювання у прямому контакті з відпрацьованими топковими газами, наприклад, від котельні або ТЕЦ. Це дозволило б разом з переробкою ДР та використанням теплоти, що зазвичай даремно розсіюється в навколишньому середовищі, очищати топкові гази від кислих компонентів, таких як оксиди сірки й азоту. Останнє можливо завдяки тому, що ДР має лужну реакцію ( $\text{pH} > 10$ ).

Відомі конструкції апаратів для випарювання розчинів топковими газами (апарати заглибленого горіння), що призначені для використання високопотенційних продуктів згоряння, мають високий гідравлічний опір, а контактування в них здійснюється в одну ступінь. Перераховані недоліки роблять використання відомих апаратів заглибленого горіння неприйнятними для випарювання ДР у прямому контакті з низькопотенційними топковими газами. Устаткуванням, що є найбільш придатним для цього, є колонний апарат (скрубєр), однак відомі конструкції скрубєрів недостатньо пристосовані для проведення процесів з рідинами, що утворюють відкладення. Проектуванню устаткування для реалізації процесу випарювання ДР у прямому контакті з топковими газами заважає також мала вивченість досить складних процесів масо- і теплопереносу, що протікають при безпосередньому контакті багатоконпонентного розчину й газової суміші, якими є дистилерна рідина й топковий газ.

Таким чином, актуальною науково-практичною задачею є розробка методів розрахунку та конструкції скрубєру й дослідження процесів тепло- і масопередачі, що протікають при взаємодії ДР із топковими газами. Рішення поставленої задачі визначило напрямок дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі хімічної техніки та промислової екології НТУ «ХПІ» відповідно до напрямку наукових досліджень кафедри в галузі процесів та обладнання хімічної технології.

Здобувач, як відповідальний виконавець, брав участь у наукових дослідженнях в рамках госпдоговору «Визначити можливість зниження об'ємів дистилерної рідини та енерговитрат за рахунок спрямування хлоридних конденсатів донасичених сіллю на стадію абсорбції» з ВАТ «Кримський содовий завод» (м. Красноперекопськ), а також договору про творчу співпрацю між Національним технічним університетом «ХПІ» та Науково-дослідним і проектним інститутом основної хімії (НДІОХІМ, м. Харків).

**Мета й завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є створення наукової основи проектування апаратів для випарювання дистилерної рідини в прямому контакті з топковими газами. Для реалізації цієї мети поставлено та вирішено наступні завдання:

- на підставі аналізу науково-технічної літератури обрати конструкцію контактного елемента, що може працювати в умовах утворення відкладень;
- створити лабораторну установку й розробити методику проведення досліджень тепло- і масообміну між топковим газом і дистилерною суспензією содового виробництва;
- дослідити гідродинамічні особливості плинину газу й рідини по контактним елементам;
- дослідити закономірності тепло- і масообміну в процесі контактування дистилерної суспензії з топковими газами на контактних елементах;
- створити математичну модель процесу взаємодії дистилерної рідини з топковими газами, яка враховує вплив випарювання води на абсорбцію кислих компонентів топкових газів;
- використати математичну модель для розрахунку апарату, провести чисельні розрахунки тепло- та масообмінних процесів в скрубєрі призначеному для утилізації теплоти скидних топкових газів шляхом випарювання дистилерної суспензії;
- розробити рекомендації для промислового використання процесу.

*Об'єктом досліджень* є процес взаємодії багатокомпонентного розчину, що містить кілька летких компонентів з багатокомпонентним газом, у якому присутні розчинні та малорозчинні компоненти.

*Предмет дослідження* – масообмінний апарат колонного типу й закономірності тепло- і масообміну підчас контактування дистилерної рідини й топкового газу.

*Методи дослідження* включали фізичне моделювання контактних пристроїв каскадного типу із конусними елементами у лабораторних умовах. Гідродинамічні процеси на цих моделях вивчали шляхом візуального спостереження взаємодії рідини із газом та інструментальних вимірювань. Останні, наряду із об'ємними і ваговими методами хімічного аналізу та методом чисельного вирішення зворотної задачі, застосовувалися у дослідженні закономірностей тепло- та масообміну. Обробка результатів експерименту виконувалась із використанням методів математичної статистики, а саме: регресійного аналізу та нелінійного оцінювання. При розробці рекомендацій, щодо проектування апа-

ратів для промислових випробувань та впровадження використовувались методи математичного моделювання та обчислювального експерименту на ПЕОМ.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у комплексному дослідженні контактних елементів каскадного типу з конусними тілами у застосуванні до випарювання дистилерної рідини содового виробництва в прямому контакті з топковими газами.

- вперше експериментально досліджено гідродинаміку взаємодії рідини й газу на зазначених контактних елементах, зокрема, досліджена залежність гідравлічного опору сухих і зрошуваних контактних елементів від швидкості газу й щільності зрошення рідиною, а результати узагальнено у вигляді математичних рівнянь;
- вперше експериментально досліджено режими течії рідини по конусних тілах, що утворюють контактний елемент, в умовах відсутності газового потоку та у взаємодії з ним, визначено границі утворення режимів;
- вперше експериментально досліджено тепло- і масобмінні характеристики контактних елементів з одержанням математичних рівнянь, призначених для розрахунку залежностей цих параметрів від швидкості газу й щільності зрошення;
- знайшов подальший розвиток опис механізму взаємодії топкового газу й дистилерної суспензії содового виробництва в частині врахування впливу випару вологи на кінетику сорбції кислих компонентів.

**Практичне значення одержаних результатів** для содової промисловості полягає у розробці методики розрахунку параметрів процесу випарювання дистилерної суспензії содового виробництва на контактних елементах каскадного типу з конусними тілами. Вона враховує вплив випару води на швидкість абсорбції діоксидів сірки й вуглецю, що дозволяє розрахувати апарат, як для випарювання ДР, так і якісної очистки топкових газів.

На основі випробування в заводських умовах пілотної установки розроблено рекомендації для проектування промислової установки випарювання дистилерної суспензії відпрацьованими топковими газами стосовно до умов ВАТ «Кримський содовий завод». Рекомендації передано заводу для впровадження в проект. Результати роботи використовуються також у навчальному процесі кафедри хімічної техніки й промислової екології НТУ «ХПІ»

**Особистий внесок здобувача** полягає в розробці лабораторної установки й виконанні експериментальних досліджень, у реалізації на ПЕОМ математичної моделі процесу випарювання дистилерної суспензії в прямому контакті з топковими газами й проведенні обчислювального експерименту. Автор також брав діяльну участь в обробці й узагальненні результатів заводських дослідів на пілотній установці, а також розробці рекомендацій із проектування апарату для промислової реалізації процесу випарювання дистилерної суспензії.

**Апробація роботи.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на: III Українській науково-технічній конференції з технології неорганічних речовин (Дніпропетровськ, 2006); 8-й конференції «Ма-

тематичне моделювання й інформаційні технології» (Одеса, 2008 р.), IV Українській науково-технічній конференції з технології неорганічних речовин (Дніпродзержинськ, 2008 р.), 1-ому Міжнародному конгресі «Захист навколишнього середовища, енергозбереження, збалансоване природокористування» (Львів, 2009 р.), засіданнях науково-технічної ради Науково-дослідного інституту основної хімії (м. Харків), наукових семінарах кафедри хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету «ХПІ».

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 10 наукових праць, серед них 6 статей у наукових фахових виданнях України.

**Структура й об'єм роботи.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації включає 138 сторінок, з них 25 рисунків по тексту, 6 таблиць по тексту, 1 таблиця на одній окремії сторінці, 4 додатки на 8 сторінках, 110 найменувань використаних літературних джерел на 10 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, показано її зв'язок з науковими програмами й науковим напрямком роботи кафедри, визначено мету й завдання дослідження, викладено наукову новизну й практичні результати роботи, особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію й публікації за темою дисертації.

У **першому розділі** виконано аналітичний огляд науково-технічної літератури з методів і апаратів для випарювання рідин у прямому контакті з топковими газами.

Процеси концентрування або нагрівання рідин у прямому контакті з гарячими топковими газами застосовуються в багатьох галузях промисловості. Для реалізації цього процесу знаходять застосування колонні апарати (скрубери), як з безперервним, так і східчастим контактом фаз. Питання тепло- масообміну, що протікає при випарюванні рідин у скруберах, дуже складні і потребують ретельного вивчення у кожному конкретному випадку.

Вибір типу апарата для випарювання рідини залежить від багатьох факторів, у тому числі, від властивостей газу, що використовується в якості теплоносія, властивостей рідини, можливості утворення відкладень, припустимого гідравлічного опору й ряду інших.

З великої кількості відомих способів розрахунку процесу теплообміну при взаємодії рідини з топковими газами перспективним є метод, заснований на використанні рушійної сили процесу переносу теплоти, вираженої в одиницях ентальпії.

Як контактний елемент для проведення процесу попереднього випарювання дистилерної суспензії содового виробництва найбільше заслуговують на увагу контактні елементи з конусними полками, однак у науково-технічній літературі відсутня інформація, що дозволяє спроектувати такий апарат.

Сформульовані завдання дослідження, якими, зокрема, передбачалося виконати лабораторне дослідження тепло- масообмінних і гідродинамічних характеристик декількох контактних елементів з використанням модельних рідин і газів, вибрати кращий, перевірити, а, при необхідності, і скорегувати отримані результати на заводській дослідній установці з використанням реальних рідин і газів.

**Другий розділ** присвячено опису лабораторної установки для проведення досліджень тепло- масообмінних і гідродинамічних характеристик контактних елементів, придатних для проведення процесу контактного випарювання дистилерної рідини содового виробництва, методів роботи на ній і первинної обробки результатів експериментів.

Роботу виконували на установці, що включала стенд для дослідження контактних елементів і системи його забезпечення рідиною й повітрям. Стенд складався з металевої царги підставки, двох царг внутрішнім діаметром і висотою 0,5 м і кришки із прозорого пластику. У фланцеві з'єднання між царгами можна було встановлювати до 3-х контактних елементів. Конструкція стенду включала комплект приладів для виміру параметрів процесу (витрат повітря й рідини, їх температури, абсолютного тиску повітря на вході в стенд і втрати тиску в апараті).

На рис. 1 представлено ескізи контактних елементів, які було досліджено. Відповідні розміри контактного елемента з конусним тілом (КЕКТ), конструкцію якого обрано в процесі аналізу наукової літератури, і контактного елемента з одиночним конусом (КЕОК), запропонованого нами, були однаковими, тому показані тільки для одного з них. Як базу для порівняння, було обрано відому протитечійну тарілку із крупною перфорацією (ПТКП), яка добре зарекомендувала себе при роботі з дистилерною рідиною,

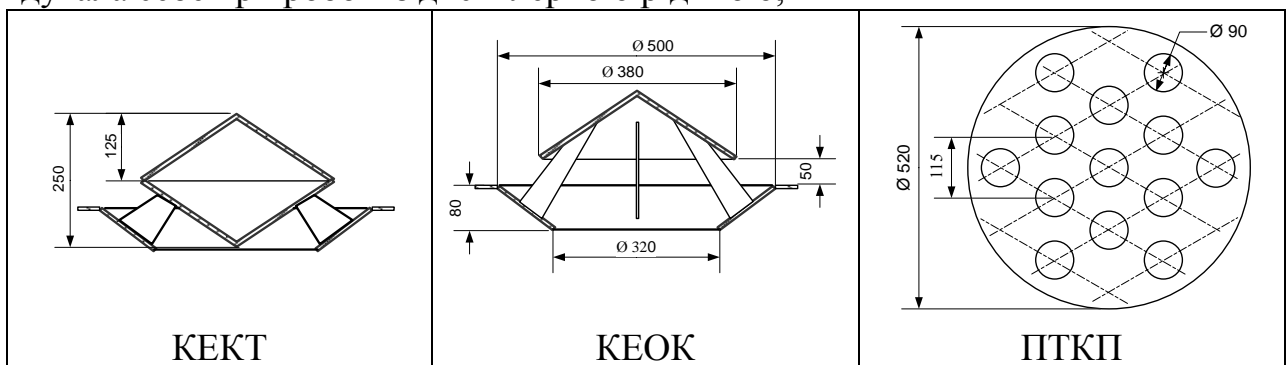


Рис. 1. Ескізи контактних елементів, що піддавалися дослідженню.

Розміри контактних елементів обрано таким чином, щоб частка вільного перетину (відношення площі перетину для проходу газу до площі поперечного перерізу царг) не була меншою за 40 %. Такий вибір, з одного боку, мінімізує гідравлічний опір, а з іншого боку – забезпечує перекриття конусних елементів з лійками в КЕКТ і КЕОК для того, щоб виключити стікання рідини, минаючи контактні елементи.

У процесі лабораторного дослідження контактних елементів, представлених на рис.1 в якості модельного газу було використане повітря. Частина дослі-

дів проводилася з водою як зрошувальною рідиною. Однак більшу частину роботи виконано з 15 % розчином хлориду натрію, за багатьма властивостями схожим з дистилерною рідиною. Діяли таким чином тому, що робота в лабораторії з дистилерною рідиною виявилася практично неможливою через наявність завислих речовин і утворення відкладень.

Дослідження проводилося в інтервалі швидкостей газу, віднесених до повного перетину дослідного апарата, від 0,2 до 5 м/с. Що стосується щільності зрошення, то в дослідіх її змінювали в інтервалі від  $0,2 \cdot 10^{-3}$  до  $5 \cdot \text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ . Можливість варіювання відстані між тарілками обмежувалася конструкцією стенду. Так при установці трьох контактних елементів воно становило 0,5 м, а при двох – 1 м, причому як відстань між тарілками приймали відстань між фланцями, привареними до контактних елементів для кріплення в розніманні між царгами дослідного стенда. Температура рідини в більшості дослідів не перевищувала  $85^\circ\text{C}$ . Мінімальною температурою обрано  $60^\circ\text{C}$ .

По результатам дослідів обчислювали швидкість газу в повному перетині апарату, щільність зрошення й коефіцієнти передачі ентальпії й маси. Для розрахунку останніх двох показників використовувався метод, заснований на вимірі витрат, вологості й температур контактуючих потоків тільки на вході й виході із лабораторного апарата. Суть методу полягає в комп'ютерному підборі таких значень коефіцієнтів передачі ентальпії й маси, щоб результати розрахунку параметрів роботи лабораторного апарата з використанням його математичної моделі збіглися з результатами експерименту.

У **третьому розділі** описано результати експериментального дослідження тепло- масообмінних і гідродинамічних закономірностей процесу випарювання модельного розчину на контактних пристроях, що представлено на рис.1.

Вивчення гідродинамічних режимів однофазного плинину рідини (без подачі газу) по конусним деталям досліджених контактних елементів КЕКТ і КЕОК показало наявність трьох режимів, що змінюють один одного зі збільшенням витрати рідини. У першому з них – режимі часткового змочування – вода стікає лише по деяким частинам поверхні верхнього конуса. Режим часткового змочування спостерігався при щільності зрошення, яка віднесена до повного перетину апарата (далі позначається –  $l$ ) менше, ніж  $0,9 \pm 0,1 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ . Для розмірів контактних елементів, що досліджувалися, це відповідає щільності зрошення, віднесеної до одиниці довжини периметра конусного елемента (далі ця величина позначена -  $f$ ) –  $0,15 \pm 0,1 \text{ дм}^3/\text{м} \cdot \text{с}$ . При збільшенні щільності зрошення понад зазначені величини настає другий режим – режим роздроблених струменів. Він характеризується повним змочуванням всієї поверхні контактного елемента, однак із краю конуса й з отвору розташованої під ним лійки вода стікає окремими струменями. При  $l > 4,3 \cdot \text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  ( $f > 0,7 \pm 0,1 \text{ дм}^3/\text{м} \cdot \text{с}$ ) настає третій режим – режим із суцільною рідинною завісою, що характеризується суцільною завісою рідини, що стікає із краю конуса й отвору лійки.

Експериментальні дані, отримані при визначенні гідравлічного опору ( $\Delta p_c$ ) сухих (не зрошуваних) контактних елементів, було узагальнено у вигляді звичайного для таких випадків рівняння:  $\Delta p_c = aw^2$  Контактні елементи, як і



очікувалося, розрізнялися за абсолютною величиною гідравлічного опору при однакових швидкостях повітря. Найменший опір був в ПТКП ( $a = 1,6$ ). У КЕКТ і КЕОК ця величина перевищувала відповідну у ПТКП більш, ніж удвічі (для КЕКТ  $a = 3,6$ , а для КЕОК  $a = 3,4$ ). Сам факт того, що опір КЕКТ і КЕОК значно більший, ніж у ПТКП, не був непередбаченим. Адже кожний із цих елементів містить, принаймні, два звуження повітряного потоку (на вході в ліжку й між краєм верхнього конуса й стінкою царги), у той час як ПТКП має тільки одне звуження в отворах.

Дослідження двофазного плинун рідини й газу в контактних елементах з одиночним конусом (КЕОК) і конусним тілом (КЕКТ) показало, що якісно гідродинамічні режими, що виникають на цих елементах, не відрізняються. Вплив щільності зрошення на плин рідини візуально не фіксується за виключенням умов, коли швидкість газу ( $w$ ) менш 0,1 м/с (тут і далі швидкість газу відноситься до повного перетину апарата). В режимі роздроблених струменів за зазначеної швидкості газ майже не впливає на струмені рідини. На відміну від цього в режимі суцільної рідинної завіси газ за найменшої швидкості починає рвати завісу і взаємодіяти з рідиною, але ця взаємодія за умов, коли  $w < 1$  м/с є незначною. За швидкості газу в інтервалі  $1 < w < 2,5$  м/с має місце перехідний режим, на зміну якому приходить режим внутрішньої циркуляції, що виникає при  $w > 2,5$  м/с, коли рідина дробиться й виноситься газом із країв конусних елементів, а потім сепарується під конусом, що знаходиться вище, і стікає назад. Захлинання досліджених контактних елементів настає за швидкості газу більшої за 3,7-4,1 м/с.

Результати визначення гідравлічного опору зрошуваних КЕОК і КЕКТ наведено на рис. 2. Із графіків видно, що для обох контактних елементів у дослідженому діапазоні щільності зрошення загальний характер зміни гідравлічного опору з ростом швидкості газу однаковий.

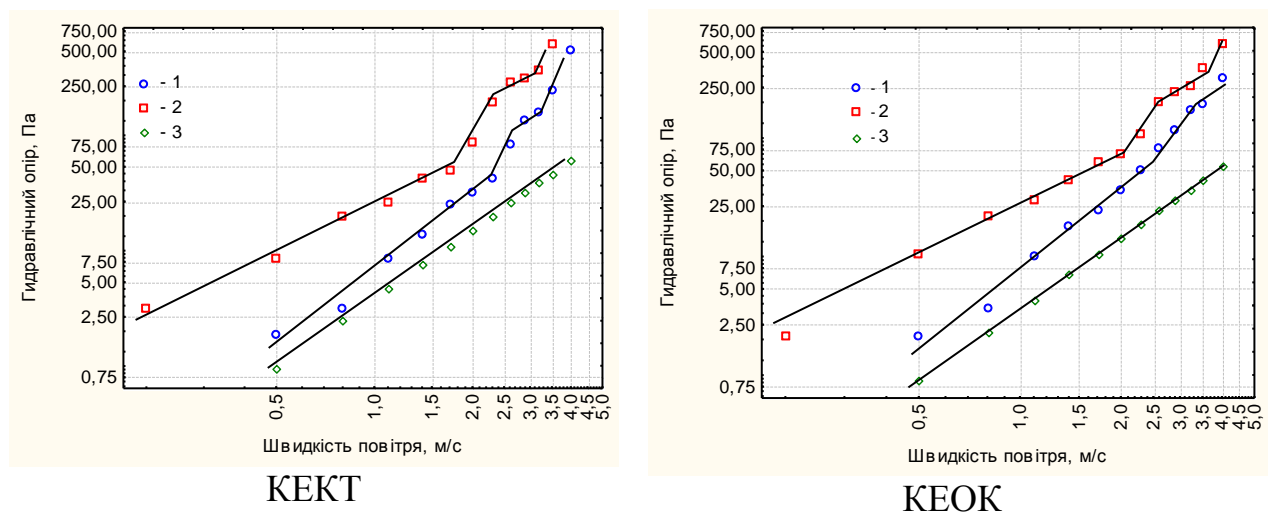


Рис. 2. Гідравлічний опір контактних елементів.  
Щільність зрошення: 1 –  $0,8 \cdot \text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ; 2 –  $4,5 \cdot \text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ; 3 – без зрошення

Незважаючи на наявність зламів у залежності гідравлічного опору ( $\Delta p_{op}$ ) КЕОК і КЕКТ від швидкості газу й щільності зрошення, результати дослідів задовільно описуються відносно єдиним рівнянням

$$\Delta p_{op} = a_1 (w \cdot \rho_2)^{b_w} (l \cdot \rho_{жс})^{b_l}, \quad (1)$$

де  $\rho_2$  і  $\rho_{жс}$  – щільності повітря й рідини, що зрошує, відповідно, кг/м<sup>3</sup>.

Значення коефіцієнтів цього рівняння  $a_1$ ,  $b_w$ , і  $b_l$ , які отримані в результаті спільної обробки вимірів, що їх зробили у дослідах з водою й 15 %-ним розчином хлориду натрію, наведено в табл. 1.

Таблиця 1.

Коефіцієнти й характеристики точності рівняння (1).

Тип тарілки	Коефіцієнти			Стандартна помилка, Па	Частка поясненої варіації, %
	$a_1$	$b_w$	$b_l$		
КЕКТ	0,245	2,70	0,50	18	97
КЕОК	0,546	2,62	0,38	10	98
ПТКП	0,105	2,45	0,55	23	95

Таким чином, порівняння гідродинамічних характеристик контактних елементів, придатних для роботи із суспензіями, що викликають утворення відкладень на внутрішніх пристроях апарата, показало, що істотних розходжень між (КЕОК) і (КЕКТ), немає, як за характером газорідинної системи, що виникає на них, так і за гідравлічним опором. При цьому перший з них має більш просту конструкцію й меншу металоємність. Обидві конструкції мають гідравлічний опір в 1,6-1,9 рази більше, ніж одна ПТКП, але, оскільки й КЕОК, і КЕКТ еквівалентні двом ПТКП, можна говорити, що вони чинять менший опір проходженню газу. Крім того, гідродинамічні режими КЕОК і КЕКТ відрізняються від ПТКП більшою стабільністю й відтворюваністю.

Зроблено оцінку ступеню впливу температури вихідної рідини на кінетику передачі ентальпії і масопередачі на контактних пристроях з конусними елементами. Встановлено, що температура незначно, хоча й помітно, впливає на швидкість тепло- і масопередачі.

Вивчено вплив гідродинамічних факторів на коефіцієнти передачі ентальпії і масопередачі в процесі взаємодії повітря з 15 %-ним розчином хлориду натрію на контактних пристроях з конусними елементами. Знайдено, що швидкість повітря (віднесена до повного перетину апарата) впливає на ці коефіцієнти найбільш суттєво. Щільність зрошення впливає на них менше.

У всіх досліджених контактних пристроях (ПТКП, КЕОК і КЕКТ) тепло-масообмін відбувається в об'ємі, однак є явно виражені області відновлення міжфазної поверхні: в отворах ПТКП і у звуженнях КЕОК і КЕКТ між корпусом апарата й нижньою основою одиночного конуса або конусного елемента й у нижньому отворі лійки під ним, де тепло- і масообмін найбільш інтенсивні. Тому такі контактні пристрої можна розглядати як ступені (тарілки). Оскільки в КЕОК і КЕКТ є два місця концентрації швидкості газу й енергії, для цілей ана-

лізу було прийнято вважати кожний контактний пристрій з конусними елементами блоком із двох умовних тарілок, кожна з яких характеризується середніми для двох зон контакту кінетичними коефіцієнтами. Вони й приводяться у всьому наступному викладі як коефіцієнти передачі ентальпії і масопередачі.

На рис. 3 наведено результати порівняння 3-х досліджених контактних елементів у вигляді залежності коефіцієнта передачі ентальпії від швидкості газу за умови щільності зрошення  $1 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  і температури вихідного розчину  $70^\circ\text{C}$ .

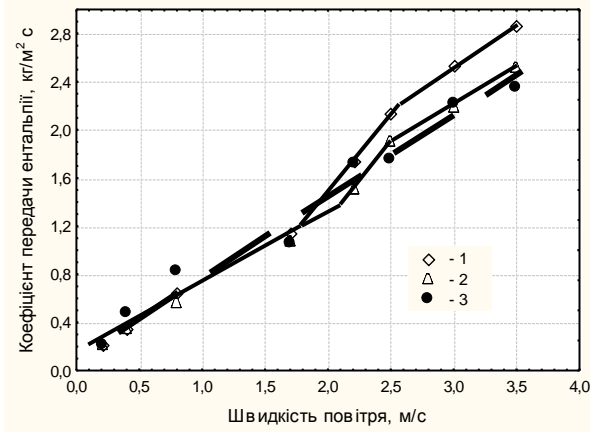


Рис. 3. Залежність коефіцієнту передачі ентальпії від швидкості газу для контактних елементів досліджених конструкцій; 1 – КЕОК; 2 – КЕКТ; 3 – ПТКП

Характеризуючи взаємне положення графіків залежностей коефіцієнта передачі ентальпії ( $k_H$ ) від швидкості повітря, можна відзначити, що в інтервалі  $0,7-1,2 \text{ м/с}$  розходження між дослідженими контактними елементами лежать у межах точності дослідів. При подальшому ж збільшенні швидкості повітря КЕОК і КЕКТ показують дещо більш високі значення коефіцієнта передачі ентальпії, ніж ПТКП, причому, якщо між КЕКТ і ПТКП розходження досить незначне, то в інтервалі швидкостей повітря  $2,5-3 \text{ м/с}$   $k_H$  для КЕОК перевищує це значення для ПТКП більш, ніж на 20 %. Таким чином, із трьох розглянутих контактних елементів, найкращі показники за коефіцієнтом передачі ентальпії виявилися в КЕОК.

На рис. 4 наведено узагальнення результатів дослідження залежності передачі ентальпії від швидкості повітря у повному перетині апарата й щільності зрошення у вигляді номограм.

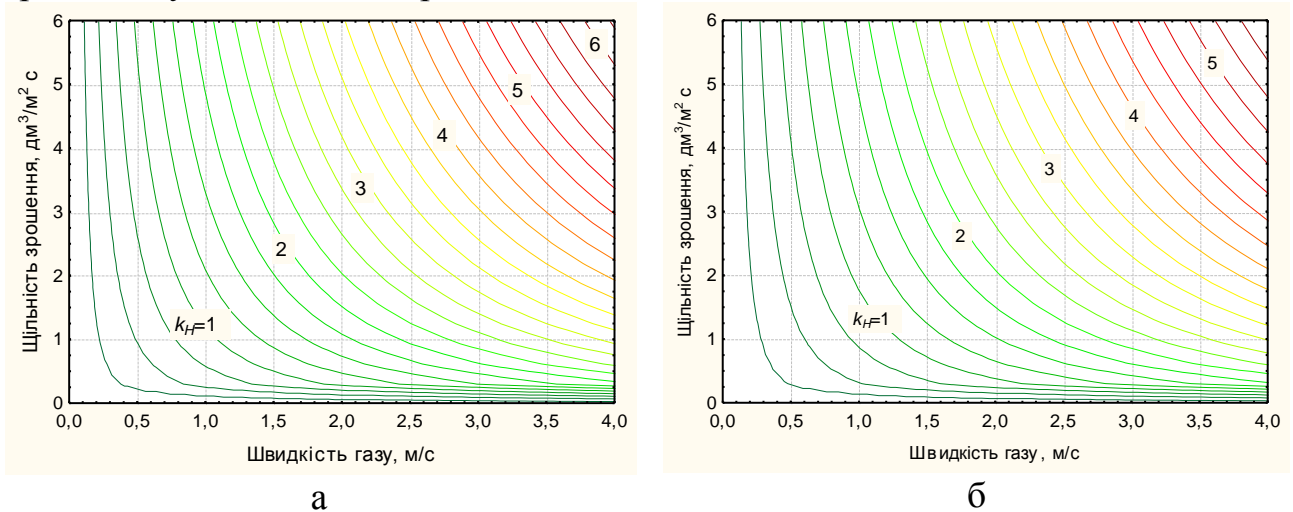


Рис. 4. Залежність коефіцієнту передачі ентальпії на КЕОК (а) і на КЕКТ (б) від гідродинамічних факторів.

Аналогічним чином (рис.5) узагальнено результати дослідження залежності коефіцієнту масопередачі від швидкості повітря у повному перетині апарата й щільності зрошення.

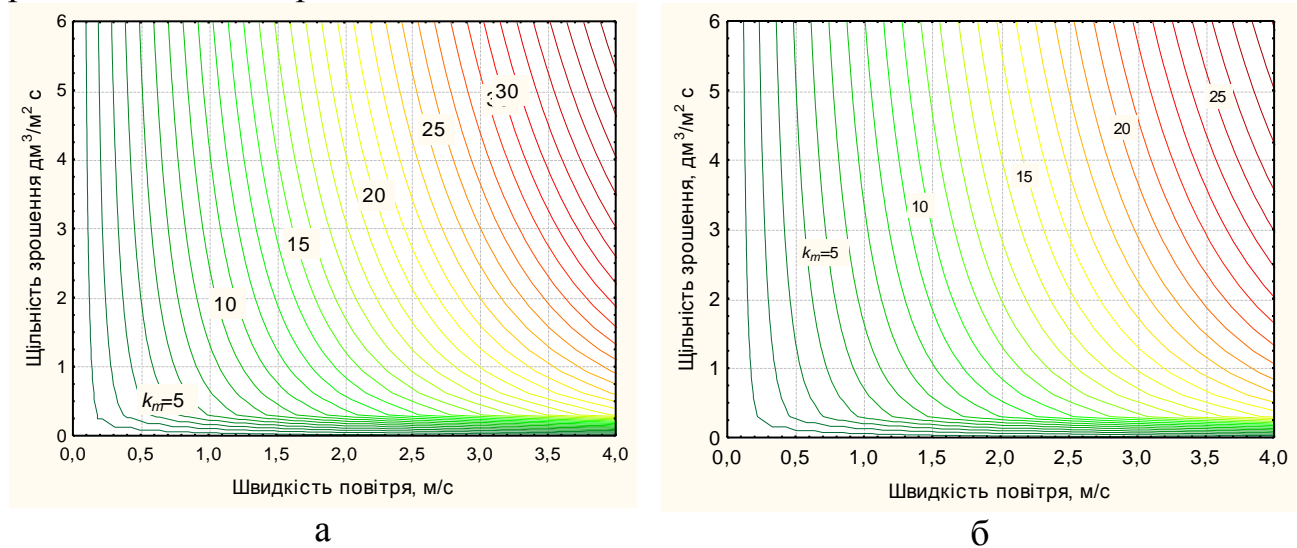


Рис. 5. Залежність коефіцієнту масопередачі на КЕОК (а) і на КЕКТ (б) від гідродинамічних факторів.

Математична обробка результатів лабораторного дослідження процесу випарювання 15 %-ного розчину хлориду натрію в прямому контакті з повітрям на контактних пристроях з конусними елементами полягала в підборі найбільш підходящого емпіричного рівняння (підбір здійснювався шляхом максимізації частки поясненої варіації) і розрахунку коефіцієнтів рівнянь із використанням програми нелінійного оцінювання. Математична обробка показала, що температура розчину впливає на кінетику тепло-масообміну, хоча й істотно менше, ніж швидкість газу й щільність зрошення. Результати обробки представлено в табл. 2.

Таблиця 2.

Результати математичної обробки результатів вивчення кінетики тепло- і масопередачі на контактних пристроях з конічними елементами.

Тип	Формула для розрахунку:	
	коефіцієнта передачі ентальпії, кг/м <sup>2</sup> с	коефіцієнта масопередачі, кг/м <sup>2</sup> с
КЕОК	$k = 10,2w^{0,803}l^{0,541}/t^{0,685}$	$k_m = 7,27(1 - 0,0037t)w^{0,938}l^{0,225}$
КЕКТ	$k = (1 - 0,0047t)w^{0,825}l^{0,441}$	$k_m = 7,67(1 - 0,005t)w^{0,819}l^{0,261}$

Точність отриманих рівнянь можна охарактеризувати часткою поясненої варіації, що для всіх них перевищувала 97 %.

У четвертому розділі розглядаються питання математичного моделювання процесу випарювання дистилерної рідини в прямому контакті з топковими газами, зокрема впливу процесу випару вологи на абсорбцію оксидів сірки й вуглецю, що містяться в газі

В термінах плівкової моделі абсорбції сформульовано положення, суть яких пояснює рис. 6. З рисунку видно, що процес випару, точніше потік водяної

пари від міжфазної поверхні вглиб газової фази, впливає на розподіл парціальних тисків інших компонентів, що розподіляються між газом і рідиною, насамперед, у газовій плівці.

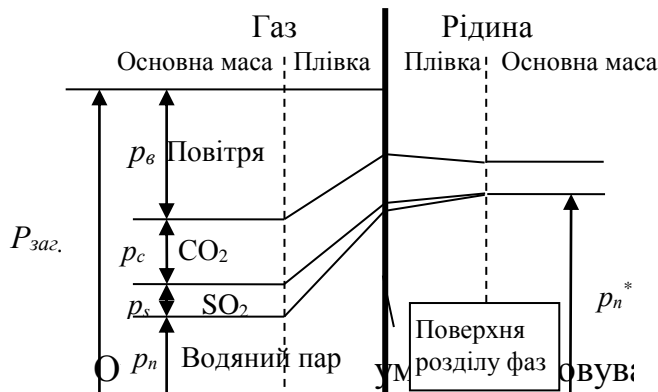


Рис. 6. Розподіл парціальних тисків компонентів поблизу поверхні розділу фаз дистилерна рідина – топковий газ.

Позначення.  $P_{zag}$  – загальний тиск газу;  $p_v$ ,  $p_c$ ,  $p_s$ ,  $p_n$ ,  $p_n^*$  – парціальні тиски повітря, діоксиду вуглецю, діоксиду сірки та парів води в повітрі і рівноважний тиск парів води над розчином, відповідно.

тиски діоксиду сірки й повітря на поверхні розділу фаз істотно менші, ніж при абсорбції рідиною, що не випаровується. А, отже, нижче повинні бути й значення швидкості абсорбції  $CO_2$  і  $SO_2$ .

Кількісну оцінку впливу процесу випару на абсорбцію кислих компонентів топкових газів дистилерною суспензією отримано на основі рівнянь багатоконпонентної сорбції. Для газу вони записуються в такий спосіб:

$$\frac{d r_1}{d y} = \frac{d r_2}{d y} = \dots = \frac{d r_j}{d y} = 0 \quad (y \geq -\delta); \quad (2)$$

$$r_j = x_j \sum_{i=1}^n r_i + D_j \frac{P_{\text{çäå}}}{RT} \frac{d x_j}{d y}, \quad (3)$$

де  $r_j$  – швидкість абсорбції  $j$ -того компонента газу, моль/м<sup>2</sup>·с;  $x_j$  – мольна частка компонента в газі;  $P_{zag}$  – загальний тиск газу, Па;  $D_j$  – коефіцієнт дифузії  $j$ -того компонента в газі, м<sup>2</sup>/с;  $y$  – лінійний розмір у напрямку, перпендикулярному поверхні розділу фаз, м.

Інтегруванням, за певних припущень, рівнянь (2) і (3) із граничними умовами  $x_j = x_{j,r}$  при  $y = -\delta$  і  $x_j = x_{j,n}$  при  $y = 0$ , де  $\delta$  – товщина газової плівки;  $x_{j,m}$  і  $x_{j,n}$  – мольні частки  $j$ -того компонента в основній масі газу й на поверхні розділу фаз, відповідно, можна одержати наступне наближене рівняння швидкості абсорбції:

$$r_i = k_a (p_i - p_{i,i}) + x_{i,\bar{a}} \sum_{j=1}^n r_j. \quad (4)$$

де  $k_r$  – коефіцієнт масовіддачі в газі, моль/м<sup>2</sup>·с Па;

Рівняння (4) є математичним виразом того факту, що транспорт компонента, що абсорбується, до поверхні розділу фаз здійснюється за допомогою двох механізмів: дифузійного (лівий доданок у рівнянні (4)) й конвективного (правий доданок). У випадку, що розглядається, потік водяної пари від поверхні розділу фаз у глиб газу, який виникає у результаті процесу випару, може бути настільки великим, що створить перешкоду для дифузії діоксидів сірки й вуглецю з газу до поверхні розділу фаз, а, отже, істотно знизить швидкість абсорбції цих компонентів.

З наведених вище положень, що характеризують взаємодію дистилерної суспензії з топковим газом (рис. 6). зроблено висновок, що швидкість випару води істотно вище швидкостей сорбції інших компонентів. Інакше кажучи, можна прийняти, що  $r_n \gg r_s$  і  $r_n \gg r_c$ , де  $r_n$ ,  $r_s$  і  $r_c$  – швидкості сорбції водяної пари, діоксиду сірки й діоксиду вуглецю відповідно. Тоді  $\sum_{j=1}^n r_j \approx r_n$  і, отже можна за-

писати, що швидкість сорбції діоксиду сірки

$$r_s = k_r p_s - x_s r_n. \quad (5)$$

Знак «мінус» перед добутком  $x_s r_n$  означає, що потоки водяної пари й діоксиду сірки в газовій плівці мають протилежні напрямки.

Використовуючи співвідношення (5), виявлено, що умовою припинення абсорбції діоксиду сірки, як, втім, і всіх інших компонентів, що є присутніми у газі в незначних кількостях, є рівність рівноважного тиску водяної пари над дистилерною рідиною загальному тиску. Тобто, при  $p_n^* = P_{заг}$ , що має місце при температурі кипіння рідини. Показано, що швидкість абсорбції діоксиду сірки за температур дистилерної рідини нижче температури кипіння буде визначатися співвідношенням:

$$r_s = k_{\bar{a}} p_s (1 - x_n^*) / (1 - x_n) = k_{\bar{a}} p_s (P_{\zeta\bar{a}\bar{a}} - p_n^*) / (P_{\zeta\bar{a}\bar{a}} - p_n), \quad (6)$$

де  $x_n^*$  – мольна частка водяної пари в газі при рівновазі з рідиною.

Аналогічно доказано, що швидкість абсорбції  $\text{CO}_2$  при випарі, води, що протікає паралельно, буде знижуватися в порівнянні з «чистою» (без випару) абсорбцією пропорційно величині відносин

$$(1 - x_n^*) / (1 - x_n) = (P_{\zeta\bar{a}\bar{a}} - p_n^*) / (P_{\zeta\bar{a}\bar{a}} - p_n) \quad (7)$$

Аналіз співвідношень (6) і (7) дозволяє прийти до висновку, що за температур далеких від температури кипіння, коли можливе розходження між фактичним і рівноважним тиском водяної пари у газі (між  $p_n^*$  і  $p_n$ ) невелике, випар води істотного не впливає на кінетику абсорбції діоксиду сірки. У випадку ж взаємодії топкового газу й дистилерної рідини, що має температуру всього на кілька градусів нижче за температуру кипіння, зниження швидкості абсорбції  $\text{SO}_2$  і  $\text{CO}_2$  може бути досить істотним.

Для цілей розрахунку кількості тарілок дослідного апарату й прогнозування його роботи відомі алгоритм і програма розрахунку апарату для випарювання водяних розчинів у прямому контакті з газами було адаптовано до розрахунку випарювання дистилерної рідини на тарілках з конусними елементами. Зокрема, у блоках розрахунку коефіцієнтів передачі ентальпії й маси були замінені розрахункові рівняння на отримані для КЕОК. Також було введено блоки розрахунку абсорбції  $\text{SO}_2$  і  $\text{CO}_2$ , що враховують розвинені вище положення про вплив випару води на кінетику абсорбції цих компонентів.

**У п'ятому розділі** розглянуто результати випробування в заводських умовах на ВАТ «Кримський содовий завод» дослідного апарату для випарювання дистилерної рідини. Схему дослідної установки, що її було змонтовано на содовому підприємстві, представлено на рис. 7.

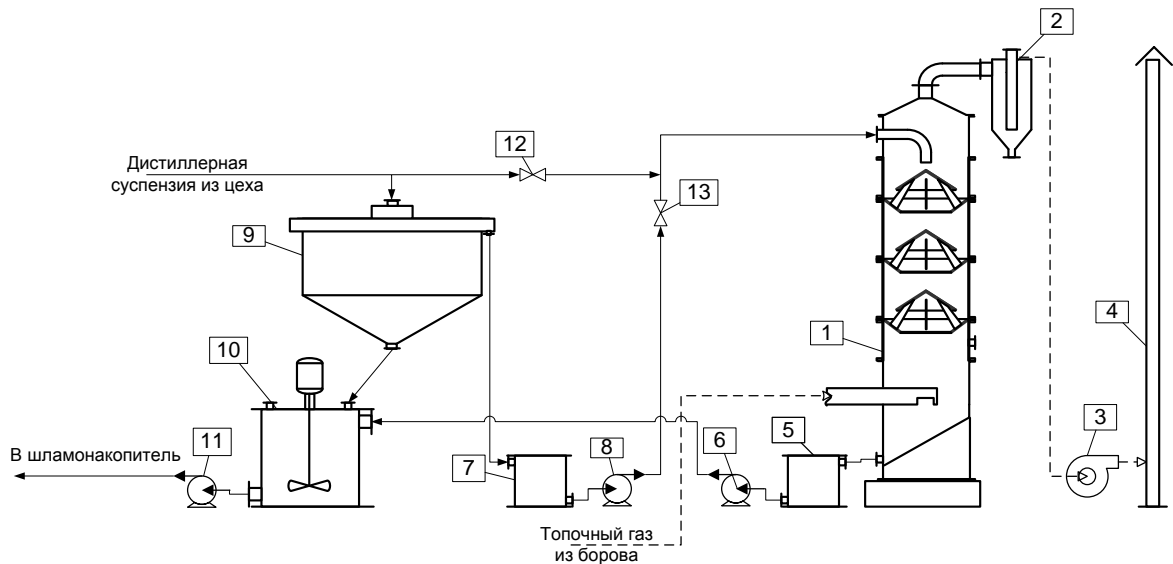


Рис. 7. Заводська дослідна установка для дослідження процесу випарювання дистилерної рідини.

Основне устаткування експериментальної установки включало: скруббер (поз. 1) для випарювання дистилерної рідини теплом відпрацьованих топкових газів, відстійник (поз. 9) для освітлення дистилерної рідини і вентилятор (поз. 3) для відсмоктування охолоджених топкових газів зі скрубера. Також до складу установки входили баки (поз. 5, 7, 10) і насоси (поз. 6, 8, 11), уловлювач бризок, (поз. 2) і вихлопна труба (поз. 4).

Дистилерна суспензія із цеху надходила у відстійник (поз. 9), звідки згущена її частина зливалася в збірник з мішалкою (поз. 10). Світла частина по переливу стікала в збірник (поз. 7), звідки насосом (поз. 8) через відкритий кран (поз. 13) подавалася на зрошення скрубера (поз. 1). Частково упарена ДР відводилася з нижньої частини скрубера. Схема передбачала також можливість зрошення скрубера невідстояною дистилерною рідиною. У цьому випадку вона надходила безпосередньо із цеху через відкритий кран (поз. 12) на зрошення скрубера, минаючи відстійник. Кран поз. 13 при цьому закривали.

Дослідний апарат мав діаметр 1200 мм і висоту 5500 мм. Відстань між тарілками становила 600 мм. В апарат було встановлено 3 контактних елементи типу КЕОК. Контактний елемент (КЕОК) був виконаний геометрично подібним до пристрою, дослідженому в лабораторних умовах.

У процесі випробувань заводської установки вирішувалися наступні завдання: перевірка результатів лабораторних досліджень у частині гідравлічного опору й тепло- масообмінних характеристик контактних елементів з одиночним конусом (КЕОК); за необхідності, корегування отриманих у лабораторних дослідках рівнянь; визначення ступеня вловлювання діоксиду сірки й динаміки утворення інкрустацій на тарілках і стінках апарата.

Середній за час дослідів склад газу (в об'ємних частках) був наступним:  $\text{CO}_2$  – 8,6 %,  $\text{O}_2$  – 5,2 %. Температура газу, що надходив в установку в період випробування, коливалася в межах 155-205 °С, вологовміст – від 0,032 до 0,068 кг/кг сухого газу, а витрата газу (приведеного до нормальних умов) – від 7500 до 8500 м<sup>3</sup>/год. Склад світлої частини дистилерної рідини в процесі дослідів

практично не мінявся й становив (у масових відсотках):  $\text{NaCl} - 5,2$ ,  $\text{CaCl}_2 - 10,1$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2 - 0,28$ ,  $\text{CaSO}_4 - 0,1$ . Концентрація твердої частини (шламу) дистилерної рідини – 30-40 г/л. Температура - 90-95 °С. Витрату рідини міняли в інтервалі від 2 до 5 т/год.

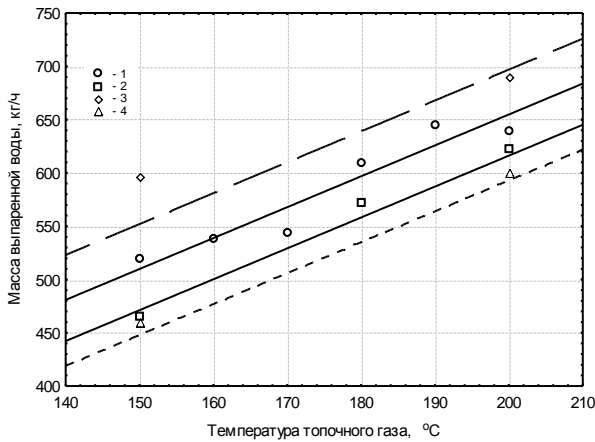


Рис. 8. Залежність маси випареної води від температури топкового газу при вологовмісті (кг/кг сухого газу) і витраті (кг/ч) топкового газу, відповідно: 1 – 0,035 і 10000; 2 – 0,065 і 10000; 3 – 0,035 і 10500; 4 – 0,05 і 9500

півнь впливу цих факторів різних. Оцінити його можна з аналізу залежностей, отриманих за результатами дослідів для розрахунку температури рідини, що виходить із апарата ( $t_{вих}$ ) і маси випареної води ( $G_{\text{H}_2\text{O}}$ ) від параметрів процесу:

$$t_{\text{вих}} = 45 + 0,083 \cdot t_{\text{газ}} + 180 \cdot x_{\text{газ}} - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot G, \quad (8)$$

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = 2,9 \cdot t_{\text{газ}} - 1290 \cdot x_{\text{газ}} + 0,084 \cdot G - 720 \quad (9)$$

де  $t_{\text{Г ВХ}}$  – температура газу на вході в скруббер, °С;  $x_{\text{Г ВХ}}$  – вологовміст газу, кг/кг сухого газу;  $G$  – масова витрата газу, кг/год

За результатами заводських дослідів було скореговано рівняння для розрахунку гідравлічного опору скрубера й кінетичних коефіцієнтів. Оскільки точність заводських дослідів, як це буває звичайно, не допускає можливості оцінити показники ступеню при швидкості газу й щільності зрошення, корегуванню були піддані тільки коефіцієнти пропорційності у відповідних рівняннях (табл. 2), отриманих у лабораторних дослідах. Так гідравлічний опір контактного елемента у випробуваному скруббері можна розрахувати за рівнянням  $\Delta p_{i\delta} = 1,54(w \cdot \rho_a)^{2,62} (l \cdot \rho_a)^{0,38}$ , коефіцієнт передачі ентальпії –  $k_H = 8,42w^{0,803}l^{0,541}/t^{0,685}$  і коефіцієнт масопередачі –  $k_m = 5,5(1 - 0,0037t)w^{0,938}l^{0,225}$ . Порівнюючи наведені дані з результатами лабораторних дослідів (табл.2) можна бачити, що, як гідравлічний опір, так і кінетичні коефіцієнти у випробуваному апараті виявилися на 15-20 % нижчими, ніж при вивченні цих параметрів на малогабаритній лабораторній моделі.

На рис. 8 наведено результати визначення маси випареної води залежно від температури газу при різних значеннях його вологовмісту й витрати. Відношення масових витрат газу й дистилерної рідини підтримувалося постійним – 3 т газу на 1 т рідині.

Використовуючи графіки на рис. 8 можна порахувати, що при відношенні газ – рідина й параметрах топкового газу, що мали місце при випробуванні, із дистилерної рідини може бути вилучено від 12 до 19 % води.

Досліди також показали, що маса випареної води й температура рідини, що виходить із апарата визначаються (при заданому співвідношенні газ – рідина) витратою, температурою й вологовмістом топкового газу, однак ступінь впливу цих факторів різних.



Дослідження уловлювання діоксиду сірки в процесі випарювання дистилерної суспензії топковим газом показали, що при коливанні концентрації  $\text{SO}_2$  у газі від 0,6 до 1,7 г/м<sup>3</sup> ступінь уловлювання цього компонента досягає 96-98 %.

За результатами роботи підготовлено рекомендації для проектування установки випарювання дистилерної рідини содового виробництва з використанням в якості теплоносія топкових газів котельної установки ВАТ «Кримський содовий завод». Рекомендації передано підприємству для розробки проекту, про що є відповідний акт.

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведено рішення науково-технічного завдання виявлення й вивчення основних тепло- масообмінних і гідродинамічних закономірностей процесу випарювання дистилерної рідини содового виробництва відпрацьованими топковими газами в прямому контакті на контактних пристроях з конусними елементами. Зроблено наступні висновки.

1. На підставі аналізу фахової літератури обґрунтовано, що найбільш перспективними з точки зору стабільної роботи в умовах утворення відкладення є контактні пристрої із конусними елементами. У дослідженні використовували два види таких пристроїв: один з конусним тілом та другий з одиночним конусом, що розміщені над воронкою.
2. Дослідження гідродинамічних режимів однофазного плинину рідини (без подачі газу) по конусним елементам показало наявність трьох режимів, що змінюють один одного зі збільшенням витрати рідини: режим часткового змочування, режим роздроблених струменів і режим із суцільною рідинною завісою.
3. Дослідження двофазного плинину рідини й газу в контактних елементах з одиночним конусом і конусним тілом показало наявність трьох видів цих режимів: режиму незбурених струменів, перехідного режиму і режиму внутрішньої циркуляції. Отримано рівняння для розрахунку гідравлічного опору зрошуваних контактних елементів.
4. Встановлено, що температура здійснює незначний, хоча й помітний, вплив на швидкість тепло- і масопередачі в процесі випарювання рідини на контактних пристроях з конусними елементами.
5. Вивчено вплив гідродинамічних факторів на коефіцієнти передачі ентальпії й маси в процесі взаємодії повітря з 15 %-ним розчином хлориду натрію на контактних пристроях з конусними елементами. Знайдено, що швидкість повітря впливає на ці коефіцієнти найбільш істотно. Вплив на них щільнісні зрошення значно менший. Отримано рівняння для розрахунку коефіцієнтів передачі ентальпії й маси.
6. Виконано математичну обробку результатів експериментального дослідження процесу випарювання 15 % розчину хлориду натрію в прямому контакті з повітрям. Отримано розрахункові залежності для обчислення цих коефіцієнтів залежно від швидкості газу, щільності зрошення й температури.

7. Виконано теоретичний аналіз механізму процесу абсорбції діоксиду вуглецю й діоксиду сірки дистилерною рідиною, що протікає паралельно з випаром води. Показано, що швидкість випару води впливає на кінетику абсорбції  $\text{SO}_2$  і  $\text{CO}_2$ . Отримано розрахункові рівняння, що дозволяють враховувати цей вплив.
8. Алгоритм і програма розрахунку апарата для випарювання водяних розчинів у прямому контакті з газами адаптовано до розрахунку випарювання дистилерної рідини на тарілках з конусними елементами. Зокрема, у блоках розрахунку коефіцієнтів передачі ентальпії й маси замінено розрахункові рівняння на отримані для КЕОК. Також були уведено блоки розрахунку абсорбції  $\text{SO}_2$  і  $\text{CO}_2$ .
9. У заводських умовах на реальних рідинах і газах випробувано дослідний скруббер для випарювання дистилерної рідини скидними топковими газами. Визначено кількість води, що може бути випарена таким способом залежно від температури й вологовмісту газу, а також ступеню уловлювання  $\text{SO}_2$ . З урахуванням досвіду експлуатації апарату виконано корегування рівнянь для розрахунку гідравлічного опору й кінетичних параметрів тепло- масопередачі.
10. Результати дисертаційної роботи впроваджені на підприємстві ВАТ «Кримський содовий завод» та у навчальний процес на кафедрі хімічної техніки та промислової екології НТУ «ХП».

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Марван Эль Дассуки. Абсорбционная очистка газов от диоксида серы с использованием отходов содового производства./ Марван Эль Дассуки, Цейтлин М.А., Райко В.Ф. // Вісник національного технічного університету «ХП» – Харків: НТУ «ХП», 2008 – № 43. – С. 90 – 93.  
Здобувач розробив методику експерименту та приймав участь обробці та інтерпретації експериментальних даних.
2. Марван Эль Дассуки.. Взаимодействие топочных газов с дистиллерной суспензией / Марван Эль Дассуки, М.А. Цейтлин, В.Ф. Райко.// Східноєвропейський журнал передових технологій. – Харків: Технологічний центр, 2008. – №4/6 (34).– С. 41-44..  
Здобувач розробив теоретичну модель впливу процесу випарювання на абсорбцію діоксидів сірки та вуглецю.
3. Марван Эль Дассуки.. Исследование гидродинамических характеристик каскадного контактного устройства / Марван Эль Дассуки, М.А. Цейтлин // Інтегровані технології та енергозбереження – Харків: НТУ „ХП”, 2009.– № 1.– С. 41- 47.  
Здобувач виконав експериментальну частину роботи та приймав участь в опрацюванні одержаних результатів.
4. Марван Эль Дассуки. Концентрирование производственных стоков в прямом контакте со сбросными топочными газами / Марван Эль Дассуки, В.Ф. Райко, М.А. Цейтлин // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій// Зб. науков. праць серія „Технічні науки” – Одеса: ОНАХТ, 2009.– Вип. 35.– Т 2.– С. 219 - 222.

Здобувач розробив методику експерименту та приймав участь обробці та інтерпретації експериментальних даних.

5. Марван Эль Дассуки. Пенообразование в процессе выпаривания дистиллерной жидкости содового производства. / Марван Эль Дассуки, В.Ф. Райко, А.В. Колосов // Химия и технология производств основной химической промышленности.– Харьков: НИОХИМ.– 2010.– Т. 76.– С. 81- 87.

Здобувач виконав експериментальну частину роботи та прийняв участь у обробці експериментальних даних та інтерпретації результатів.

6. Марван Эль Дассуки. Исследование массообмена на контактных элементах с конусными телами. / Марван Эль Дассуки, М.А. Цейтлин, В.Ф. Райко. // Східноєвропейський журнал передових технологій. – Харків: Технологічний центр, 2011.– № 4/8 (52).– С. 38-41.

Здобувач виконав експериментальну частину роботи та прийняв участь у обробці експериментальних даних та інтерпретації результатів.

7. Марван Эль Дассуки. Использование вторичных энергоресурсов содового производства для получения твердой поваренной соли / Марван Эль Дассуки, В.Ф. Райко, М.А. Цейтлин // Тези доповідей III Української наук. Техн. конференції з технології неорганічних речовин. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2006. – С. 215.

Здобувач розрахував можливість та доцільність концентрування відходів дистиляції содового виробництва.

8. Марван Эль Дассуки. Математическое моделирование взаимного влияния процессов абсорбции и испарения / Марван Эль Дассуки, В.Ф. Райко, М.А. Цейтлин // Сборник тезисов 8-й конференции «Математическое моделирование и информационные технологии».– Одесса: ОДАХ, 2008.– С. 69.

Здобувач розробив теоретичну модель впливу процесу випарювання на абсорбцію діоксидів сірки та вуглецю.

9. Марван Эль Дассуки. Теплообменники прямого контакта в процессах утилизации вторичной теплоты в содовом производстве. / Марван Эль Дассуки, М.А. Цейтлин, В.Ф. Райко // Збірник матеріалів IV Української науково-технічної конференції з технології неорганічних речовин. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2008.– С. 32, 33.

Здобувач запропонував та дослідив новий контактний елемент для контактного теплообмінника, який дозволяє тривалий час працювати в умовах утворення відкладень та інкрустацій.

10. Марван Эль Дассуки. Інноваційні технології енергозбереження та використання ВЕР. / Марван Эль Дассуки, М.А. Цейтлин, В.Ф. Райко.// Зб. матеріалів 1 Міжнарод. конгресу. Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. - Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2009.– С. 109

Здобувач запропонував новий апарат та технологію концентрування дистилерної рідини содового виробництва з використанням теплоти відпрацьованих топкових газів.

## АНОТАЦІЇ

**Марван Ель Дассукі. Закономірності тепло- масообмінних та гідродинамічних процесів контактного випарювання дистилерної рідини у содовому виробництві. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2012.

Виконано експериментальне дослідження гідродинамічних закономірностей, тепло- та масопередачі в процесі випарювання дистилерної рідини содового виробництва у прямому контакті із газом в апараті, що обладнаний каскадними контактними пристроями з конусними елементами. Вивчено вплив гідродинамічних чинників та температури на кінетику передачі ентальпії та масопередачі. Досліди проводилися на лабораторному стенді та в умовах діючого підприємства. Отримано розрахункові залежності, що дозволяють враховувати гідравлічний опір контактних пристроїв та коефіцієнти передачі ентальпії і масопередачі.

Виконано теоретичний аналіз впливу випаровування води на процес абсорбції діоксиду вуглецю й діоксиду сірки дистилерною рідиною. Отримано розрахункові рівняння, що дозволяють враховувати цей вплив. Їх застосовано до вдосконалення математичної моделі апарату для випарювання сольових розчинів у прямому контакті з газом.

Розроблений апарат для випарювання дистилерної рідини топковими газами випробувано в умовах діючого підприємства. Розроблено рекомендації до застосування цього апарату у содовому виробництві.

*Ключові слова:* содове виробництво, випаровування, охолодження, утилізація теплоти, контактні пристрої, гідродинаміка, тепло- масопередача, дистилерна рідина, топкові гази, вторинні енергетичні ресурси,.

**Марван Эль Дассуки. Закономерности тепло- массообменных и гидродинамических процессов контактного выпаривания дистиллерной жидкости в содовом производстве. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2012.

В диссертации приведено новое решение научно-практической задачи выявления и изучения основных тепло- массообменных и гидродинамических закономерностей процесса выпаривания дистиллерной жидкости содового производства отработанными топочными газами на контактных устройствах с конусными элементами.

Исследовались гидродинамические, тепло- и массообменные процессы протекающие на контактных устройствах каскадного типа двух конструкций. Одна из них имела вид коническая полки, образующей диффузор, а над ней располагалось тело, представляющее собой два конуса, соединенные основаниями. Вторая конструкция была разновидностью первой, отличающейся тем, что над конической полкой размещался конус, ориентированный вершиной вверх.

Исследование гидродинамических режимов однофазного течения жидкости по конусным элементам показало наличие трех режимов, сменяющих друг

друга по мере увеличения расхода жидкости: режим частичного смачивания, режим раздробленных струй и режим со сплошной жидкостной завесой.

Изучение двухфазного течения жидкости и газа в контактных элементах с одиночным конусом и с конусным телом показало, что возникающие на них при одинаковых расходах газа и жидкости гидродинамические режимы качественно не отличаются. Влияние плотности орошения на течение жидкости визуально не фиксируется за исключением условий, когда скорость газа, отнесенная к полному сечению аппарата не превышает 0,1 м/с. В режиме раздробленных струй при указанной скорости газ почти не влияет на струи жидкости. В отличие от этого, в режиме сплошной жидкостной завесы газ при минимальной скорости начинает рвать завесу и взаимодействовать с жидкостью, но это взаимодействие до скорости газа 1 м/с является незначительным. В интервале скоростей газа 1 - 2,5 м/с имеет место переходный режим. На смену ему приходит режим внутренней циркуляции, которая возникает при скорости газа более 2,5 м/с. В этом режиме жидкость дробится и выносится газом с краев конусных элементов, а затем сепарируется под конусом, расположенным выше, и стекает назад. «Захлебывание» исследованных контактных элементов наступает при скорости газа более 3,7-4,1 м/с.

Исследована зависимость гидравлического сопротивления орошаемых контактных элементов от скорости газа и плотности орошения. В результате математической обработки экспериментальных результатов получено уравнение, характеризующее эту зависимость.

Изучено влияние гидродинамических факторов и температуры на коэффициенты передачи энтальпии и массы в процессе взаимодействия воздуха с 15 %-ным раствором хлорида натрия на контактных устройствах с конусными элементами. Найдено, что скорость воздуха оказывает наибольшее влияние на эти коэффициенты. Плотность орошения влияет на них в меньшей степени. Получены экспериментальные функции для расчета коэффициентов передачи энтальпии и массы.

Выполнена математическая обработка результатов экспериментального исследования процесса упаривания 15 %-ного раствора хлорида натрия в прямом контакте с воздухом. Получены расчетные зависимости для вычисления этих коэффициентов в зависимости от скорости газа, плотности орошения и температуры.

Выполнен теоретический анализ механизма процесса абсорбции диоксида углерода и диоксида серы дистиллерной жидкостью, протекающей параллельно с испарением воды. Показано, что скорость испарения воды оказывает существенное влияние на кинетику абсорбции  $SO_2$  и  $CO_2$ . Получены расчетные уравнения, позволяющие учитывать это влияние.

В заводских условиях на реальных жидкостях и газах испытан опытный скруббер для упаривания дистиллерной жидкости сбросными топочными газами. В процессе опытов на этом аппарате найдены зависимости температуры выходящей упаренной жидкости и массы выпаренной воды от расхода, влагосодержания и температуры газа при фиксированном соотношении газ – жидкость. Найдено, что фактором, определяющим температуру выходящей жидкости, является влагосодержание топочного газа, а массы выпаренной воды – температура газа.

Определено количество воды, которое может быть выпарено таким способом в зависимости от температуры и влажности газа. С учетом опыта эксплуатации аппарата произведена коррекция уравнений для расчета гидравлического сопротивления и кинетических параметров тепло- массопередачи. Изучена абсорбция оксидов серы из топочного газа в процессе упаривания дистиллерной жидкости. Степень очистки газа от оксидов серы составила 88,5-99 %.

Подготовлены и переданы предприятию ВАТ «Крымский содовый завод» рекомендации для проектирования установки упаривания дистиллерной жидкости отходящими топочными газами котельной.

*Ключевые слова:* содовое производство, испарение, охлаждение, утилизация теплоты, контактные устройства, гидродинамика, тепло- массопередача, дистиллерная жидкость, топочные газы, вторичные энергетические ресурсы.

**Marwan El Dassouki. Patterns of heat, mass exchange and hydrodynamics of the process of the soda ash manufacture waist liquid evaporation in direct contact with gas. – Manuscript.**

Dissertation for the scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, 2012.

The dissertation presents an experimental study of hydrodynamics, heat and mass exchange in the process of distiller liquid of soda-ash production evaporating concentration in direct contact with the gas in an apparatus equipped with cascade contact devices and cone elements. It studies the influence of hydrodynamic factors and temperature on the kinetics of enthalpy and mass transfer. The research was conducted at a laboratory installation and in a live production environment. It resulted in calculated dependencies that allow computing of the contact devices hydraulic resistance and enthalpy and mass transfer coefficients.

The author has conducted a theoretical analysis of the influence that the evaporation of water has on the process of absorption of ammonia and sulfur dioxide by distiller liquid. Equations were obtained that allow to calculate this influence. They were applied in a mathematical model of an apparatus for concentration of salt solution in direct contact with the gas.

This apparatus for evaporating concentration of distiller liquid with furnace gases was tested in live production environment. Recommendations are given on applications of such apparatuses in soda-ash production.

*Key words:* soda ash production, evaporation, cooling, heat utilization, contact devices, hydrodynamics, heat transfer, mass transfer, distiller suspense, furnace gases, waste energy.

