

Зміст

1. Вступ.....	8
2. Методи очищення газу від CO ₂	10
2.1. Моноетаноламіновою очищення конвертованого газу від діоксиду вуглецю.....	11
2.2. Характеристики моноетаноламіна.....	14
2.2.1. Застосування.....	15
2.2.2. Транспортування.....	15
2.2.3. Зберігання.....	15
2.2.4. Технічні характеристики.....	16
2.2.5. Безпека.....	16
3. Тарілока провального типу.....	17
3.1. Застосування тарілок провального типу.....	18
3.2. Режими роботи тарілок провального типу.....	21
3.3. Результати досліджень меж роботи тарілок провального типу.....	23
3.4. Результати розрахунів режимів роботи тарілок.....	31
4. Теорія масштабного переходу.....	39
5. Розрахунок вільного перерізу тарілки провального типу $D = 3,8$ м.....	41
6. Розрахунок вільного перерізу тарілки провального $D = 0,057$ м.....	57
7. Опис експериментальних установок для гідравлічних.....	73
досліджень тарілок провального типу з колонами $D = 0,057$ м.	
7.1. Опис експериментальної установки з колоною $D = 0,057$ м.....	73

7.2. Експериментальне дослідження.....	74
7.3.Пуск колони.....	75
7.4.Зупинка колони.....	75
8. Результати гідравлічнихдосліджень тарілок провального типуекспериментальноїустановки з колоною $D = 0,057$ м.....	76
Висновки.....	78
Список літератури.....	80
Додатки	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

g – прискорення сили тяжіння, м/сек²

F_c – живе перетин, м²/м²

a – ширина щілини, м

$\mu_{жс}$ – в'язкість рідини, спз

D – діаметр колони, м

ω – швидкість пара для повного перерізу колони в точці Е, м/сек²

γ_g і γ_p – питомі ваги газу (пара) і рідини, кг/м³;

g – прискорення сили тяжіння, м/с²;

d_e – еквівалентний діаметр щілини (отвору в тарілці), м;

F_c – вільний переріз тарілки, м²/м²;

μ_p – густина рідини, сп;

$\mu_в$ – густина води при 20°, сп.

$G_{ф}$ – кількість флегми, кг/год;

G_f – кількість вихідної суміші, кг/год;

G_n – кількість рідини, що проходить крізь низ колони, кг/год;

$\rho_{рід}$ і ρ_n – питомі ваги газу (пара) і рідини, кг/м³;

g – прискорення сили тяжіння, м/с²;

d_0 – діаметр отворів в тарілці, м;

f – вільний переріз тарілки, м²/м²;

$\mu_{рід}$ – в'язкість рідини, Па·с;

μ_v – в'язкість води при, 20° , $Pa \cdot s$;

V – витрата пари, m^3/s ;

L – щільність зрошення, $m^3/(m^2 \cdot год)$;

S – площа колони, m^2

D – внутрішній діаметр колони, m ;

S_0 – площа отвору, m^2 ;

N – кількість отворів, шт;

1. Вступ

У всіх розвинених країнах азотна промисловість є в даний час однією з основних провідних галузей. Бурхливий розвиток азотної промисловості пояснюється, в першу чергу, необхідністю забезпечити населення продуктами землеробства. Без мінеральних добрив, а головне азотних, неможливо вирішити завдання інтенсифікації сільського господарства. Перші етапи розвитку виробництва аміаку характеризуються вдосконаленням окремих технологічних ланок загального процесу. Будівництво нових заводів і установок здійснюється на основі все більш раціональних і досконалих технологічних схем, застосовуються все більш надійні конструкції технологічних апаратів і енергетичних машин, більш активні, селективні і стабільні каталізatori, розчинники і поглиначі, ступінь автоматизації управління виробництвом.

В даний час основним проміжним продуктом для отримання величезного числа різних азотовмісних сполук є аміак, а синтез його з водню і азоту - єдиним великомасштабним методом виробництва цього найважливішого продукту.

Сучасні агрегати синтезу аміаку створені на основі останніх досягнень науки і техніки, що дозволило добитися значного зниження енерго-матеріальних капітальних витрат, забезпечити низьку собівартість продукції, що випускається і високу продуктивність праці. Все це досягнуто в результаті розробки сучасних енерго-технологічних схем, які забезпечують високий к.к.д., використання сировини і палива, застосування високопродуктивного обладнання.

Важливу роль у виробництві аміаку грає очищення газів. Вона передбачає видалення з промислових або природних газів шкідливих і баластних домішок з тим, щоб очищений газ був придатний для транспортування, подальшої хімічної переробки і безпосереднього використання.

Абсорбції це фізико-хімічний процес поглинання речовин з розчинів чи сумішей газів рідинами з утворенням розчинів.

При абсорбції поглинання речовини відбувається всім об'ємом поглинача. Абсорбція знаходить широке застосування в хімічній, нафто-хімічній та харчовій промисловостях, головним чином для розділення газоподібних сумішей на складові частини шляхом розчинення одного чи декількох компонентів цієї суміші в рідині, яка називається абсорбентом.

Застосування нових більш ефективних абсорбентів дозволить істотно скоротити енерговитрати без значних капітальних вкладень, поліпшити якість товарної продукції і знизити токсичні викиди в атмосферу. У роботі виконано аналіз досвіду застосування етаноламінів на установках очищення.

В Абсорбції використовують тарілки провального типу. [1 – 6]

Тарілки провального типу прості за конструкцією та легкі у виготовленні, мають малу металоемність, що значно зменшує витрати на їх виготовлення. Дуже зручні в експлуатації.

Тарілки провального типу зручно і доцільно застосовувати в забрудненому середовищі. Це доцільно тим, що в апаратах можна застосовувати тарілки з великими отворами діаметри яких досягають до 120 мм, що дозволяє усунути проблему з можливим забрудненням отворів.

До недоліків тарілок провального типу можливо віднести вузький діапазон їх роботи, однак цей недолік можна усунути, шляхом точної методики розрахунку.

Рішенням цієї задачі і присвячена дана робота.

Актуальність теми пов'язана з застосуванням дірчастих тарілок у промисловості при роботі із забрудненими середовищами.

У роботі застосовуються гідродинамічне моделювання дірчастих тарілок з метою удосконалення методики їх розрахунку.

2. Методи очищення газу від CO₂

Діоксид вуглецю міститься в природному і коксовому газах, в конвертованій газі. В останньому вміст CO₂ найбільше і становить в залежності від вихідної сировини і методу конверсії 20 -30% об'ємних. Можна виділити фізичні і хімічні методи очищення від діоксиду вуглецю. Фізичні методи засновані на підвищеній розчинності його в рідинах або на конденсації CO₂ при помірному охолодженні. Більшість хімічних методів засновано на абсорбції цих домішок розчинами хімічних реагентів, а в разі тонкого очищення - на каталітичному відновленні їх H₂ до CH₄. Майже всі способи видалення CO₂ дають можливість отримати його в якості побічного продукту, що використовується у виробництві карбаміду.

Для грубої очистки газу від двоокису вуглецю застосовуються такі способи:

1. Вода очищення під тиском, а також фізична абсорбція органічними розчинниками, що мають низький тиск парів при звичайній температурі.
2. Моноетаноламінова очищення при атмосферному тиску.
3. Очищення гарячим розчином поташу.

Для тонкого очищення газу від двоокису вуглецю застосовуються такі способи:

1. Моноетаноламінова очищення під тиском.
2. Очищення водними розчинами лугів.
3. Низькотемпературна очищення органічними розчинниками з одночасним видаленням з газу двоокису вуглецю і органічних сірчистих сполук.
4. Каталітичне гідрування, здійснюване спільно з очищенням від окису вуглецю.

При виборі процесу очищення остаточною критерієм є величина приведених витрат, що залежать в основному від енергетичних і капітальних витрат.

Порівняння різних методів очищення

Критерієм порівняння процесів очищення газу, як і у всіх інших випадках, є величина приведених витрат. Однак в кожному випадку необхідно враховувати чинники, які залежать від конкретних умов і впливають на економіку процесу. Ці чинники можна розбити на три групи:

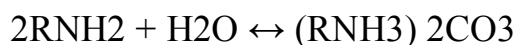
зовнішні технологічні параметри процесу - склад, тиск і температура газу, що очищається, необхідний ступінь очищення, параметри енергоресурсів (тиск пара, наявність отбросного тепла, можливість використання вторинних енергоресурсів і т. д.);

внутрішні параметри процесу - витрата тепла, електроенергії, розчинника, відходи, тип і вага апаратів;

економічні чинники - ціни на енергію, сировину, відходи, апаратуру, а також дефіцитність будь-яких видів сировини і енергії.

2.1. Monoetanolaminovaya очищення конвертованого газу від діоксиду вуглецю.

Суть методу: водні розчини MEA утворюють з CO₂ карбонати і гідрокарбонати, які при 100 ° C диссоціюють, вивільняючи CO₂.



1 моль MEA пов'язує 1 моль CO₂.

Ступінь карбонізації MEA при $p_{атм} = 0,4 - 0,5$, а при $2,5 - 3$ МПа = $0,6 - 0,75$.

Застосовують $\approx 20\%$ розчин MEA, тому що концентровані розчини

підвищують корозію апаратури, мають високу в'язкість і призводять до втрат МЕА через його окислення.

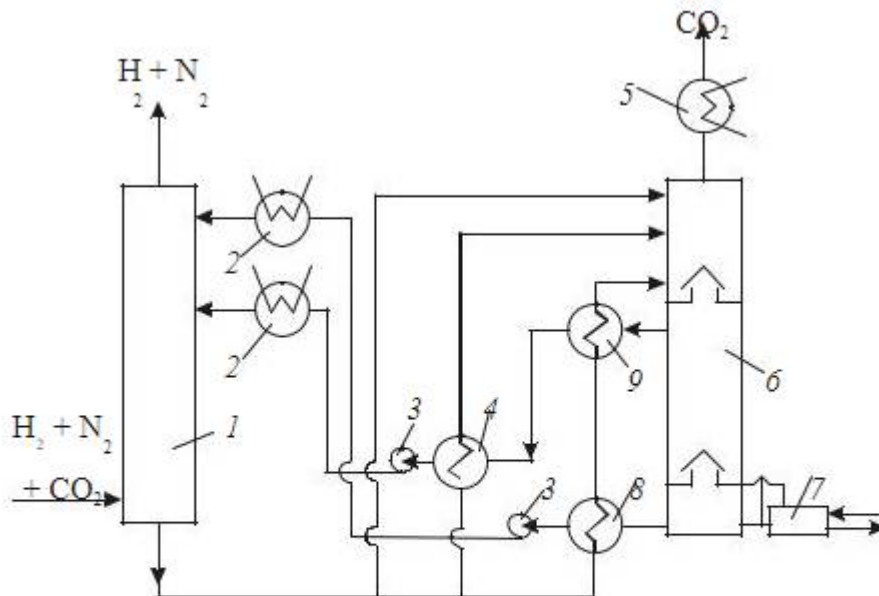


Рис. 17. Схема процесу очищення від діоксида вуглецю:
 1 – абсорбер; 2 – холодильники; 3 – насоси;
 4, 8 – теплообмінники; 5 – конденсатор; 6 – регенератор; 7
 – кипятильник; 9 – іспаритель

Опис схеми - рис. 1

Конвертований газ при 2,8 МПа і 25 - 40 ° С надходить в абсорбер 1, обладнаний сітчастими тарілками з барботажем шаром. Абсорбер складається з двох секцій: в нижній йде очищення газу до 5 - 7% CO₂ груборегенерованим розчином, який, вже наситившись CO₂ у верхній секції, змішується з потоком груборегенерованого розчину з регенератора 5. Ступінь карбонізації насиченого розчину V на виході з абсорбера - 0,65 моль CO₂ на 1 моль МЕА.

Що вийшов з абсорбера насичений розчин розгалужується на три потоки: перший (≈10%) йде на одну з верхніх тарілок регенератора. Другий (≈45%) нагрівається до 90 - 95 ° С в теплообміннику 4 і подається трохи нижче.

Третій потік ($\approx 45\%$) нагрівається до $104 - 109\text{ }^{\circ}\text{C}$ і подається в регенератор ще нижче 7, (близько 18-ї тарілки).

У верхній частині регенератора відбувається груба регенерація розчину до змісту CO_2 $0,3 - 0,35$ моль / моль МЕА. Потім розчин ділиться приблизно навпіл: одна частина йде в міжтрубний простір теплообмінника 4, охолоджується до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, далі насосом 3 прокачується через повітряний холодильник 2 і при $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ надходить на зрошення нижньої секції абсорбера.

Інша частина потоку через переливні труби всередині регенератора 6 надходить в нижню секцію того ж регенератора, де продовжує вивільняти пов'язаний CO_2 . Остаточна десорбція CO_2 з розчину МЕА відбувається в кип'ятильник 7, зазвичай обігрівается конвертованим газом. Глубокорегенерований розчин остигає до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ в теплообміннику 4 і до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ в повітряному холодильнику 2, після чого подається в верхню частину абсорбера.

В цей же час парогазова суміш виходить з абсорбера при $75 - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $0,17$ МПа, охолоджується в холодильнику 2, де водяні пари конденсуються і відокремлюються в сепараторі, з якого відводять охолоджений CO_2 .

З нижньої частини регенератора безперервно виводиться $0,5 - 1\%$ циркулюючого розчину, який направляють в смоловиделитель 7, де при нагріванні до $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ гострою парою проводиться отгонка МЕА від утворилися смолистих з'єднань. Пари МЕА і води з смоловиделителя надходять в куб-регенератор.

2.2. Характеристики моноетаноламіна

Моноетаноламін це найпростіший стабільний аміноалкоголі, Який, разом з тим, є і первинним Аміна, і первинним спиртом, а також має сильні лужні властивості. Змішування з водою відбувається в різних пропорціях, розчинення в етанолі, бензолі, хлороформі хороше. Формула - C_2H_7NO . Моноетаноламін є Невід'ємною частиною організмів (за умови оптимального білкового харчування). Отримання етаноламін в промислових масштабах здійснюється шляхом додавання аміаку до етиленоксиду при участі деяких обсягу води. У лабораторних умовах це з'єднання утворюється при впливі аміаку на етиленхлоргідрин, водного розчину аміаку на окис етилену. З отриманої суміші виділяють чисті моноетаноламін, діетаноламін і триетаноламін. Також синтез даного речовини можливий завдяки проведенню реакції нітрометан з формальдегід

Моноетаноламін, 2-аміноетанол або етаноламін, є органічним хімічною сполукою, яка є одночасно первинним Аміна і первинним спиртом (так як містить гідроксильну і аміно групи). Як і інші аміни, моноетаноламін діє як слабка основа. Етаноламін токсичний, легкозаймистий. Це безбарвна, в'язка рідина з запахом аміаку. Він дуже гігроскопічний і змішується з водою в будь-яких пропорціях. Крім моноетаноламіна (МЕА), існують також діетаноламін (ДЕА) і триетаноламін (ТЕА), всі вони відносяться до групи аміноспіртів і є антигістамінними препаратами.

Моноетаноламін отримують взаємодією етиленоксиду з водним аміаком. В ході реакції утворюються також діетаноламін і триетаноламін. Співвідношення продуктів можна регулювати шляхом зміни стехіометрії реагентів.

Органічна сполука, має вигляд густої маслянистої рідини. Змішується з водою, володіє сильними лужними властивостями.

Рідина з характерним запахом, добре розчинний у воді у всіх співвідношеннях, погано розчиняється в ефірах, бензолі, толуолі. Моноетаноламін - горюча рідина, його водні розчини - важко горючі. За ступенем впливу на організм відноситься до речовин II класу небезпеки. Володіє лужними властивостями, тому при попаданні на відкриті ділянки шкіри, є ризик опіку. Засобами гасіння є розпорошена вода, повітряно-механічна піна, порошок.

2.2.1. Застосування

Застосовують в якості абсорбентів «кислих» газів (CO_2 , H_2S , SO_2 і ін.), В процесах очищення технологічних газів на підприємствах нафтопереробної, газодобувної та хім. галузей промисловості; як сировина для отримання емульгаторів, диспергаторів, стабілізаторів пен, миючих засобів, шампунів, ПАР та ін. Моноетаноламін використовують в органічному синтезі для отримання етілендіаміна, N-вінілпіролідону і ін.

2.2.2. Транспортування

Будь-яким видом транспорту, як легковим, так і залізничним у спеціальних цистернах, з дотриманням правил безпеки як при перевезенні горючих речовин.

2.2.3. Зберігання

Повинно проводитися в сталевих бочках подалі від опалювальних приладів в критих приміщеннях. Також, не допускається його зберігання разом з агресивними або їдкими речовинами, наприклад в присутності азотної кислоти або хлору.

Гарантійний термін зберігання МЕА вищого і першого сортів - один рік, другого і третього сортів - три роки з дня виготовлення.

2. 2.4. Технічні характеристики

Фізико-хімічні властивості:

Найменування показника Норма

Вищий сорт Перший сорт

Масова частка моноетаноламіна,%, не менше 98,8 98,0

Масова частка діетаноламіну,%, не менше 0,6 1,0

Масова частка води,%, не менше 0,6 1,0

Кольоровість, одиниці Ханзо, не більше 50 -

Щільність при 20 ° С, г / см³ 1,015-1,018 1,015-1,018

2.2.5. Безпека

Моноетаноламін - легко займиста рідина. Паро-повітряні суміші вибухонебезпечні. Температура спалаху: 85/93 ° С. По впливу на людину становить речовина другого класу небезпеки. Гостра токсичність. Небезпечний продукт розкладання: кислота амінооцтова. До всього цього моноетаноламін з'єднання володіє лужними ознаками і властивостями, тому при попаданні на шкіру може утворитися опік. Засоби індивідуального захисту: респіратори, захисні окуляри, рукавички, лицьової щиток. Гасять речовина за допомогою звичайної води, порошкових з'єднань або ж піни.

3. Тарілока провального типу

За останні роки в хімічній технології для здійснення контакту газу (пари) з рідиною все більш застосовують тарілки провального типу, без переливних пристроїв, для спрощення конструкції тарілки, і площа тарілки використовується більш повно.

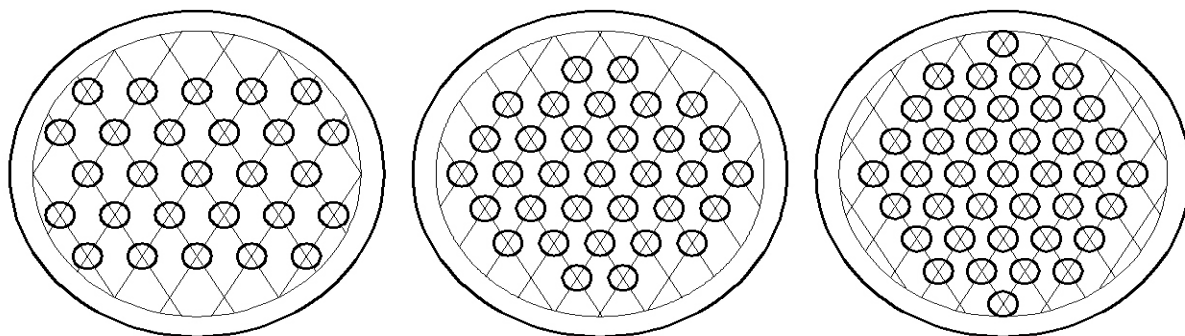


Рис. 2 тарілки провального типу

Головною особливістю цих тарілок є схема протитоку, завдяки якому відбувається повне перемішування рідини по всій висоті контактної зони. Газ (пара) і рідина проходять протитоком через одні і ті ж отвори або щілини, при цьому рідина і газ(пара) випадковим чином переміщуються по всій площі тарілки, в результаті чого на тарілці утворюється дисперсна система, характер якої залежить від ряду факторів: лінійної швидкості газу (пара), геометричних розмірів тарілки, а так само фізичних властивостей фаз.

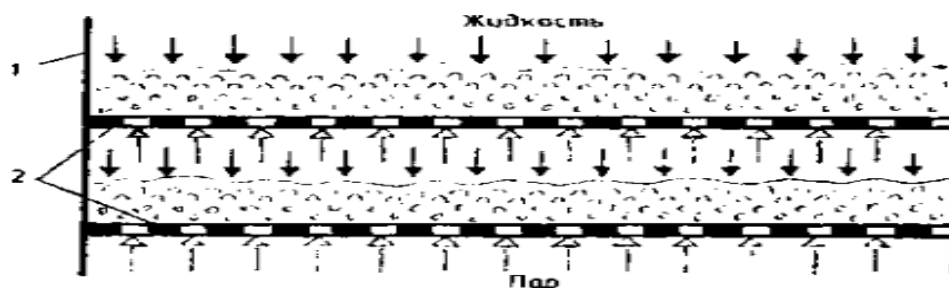


Рис. 3 Схема роботи тарілки провального типу

Колони, обладнані тарілками без переливних пристроїв, що мають ряд переваг у порівнянні з колонами, в яких встановлені тарілки інших типів: високою продуктивністю, стійкою роботою при зміні навантажень в

великихмежах, більш високою ефективністю поділу, низькою вартістю виготовлення і монтажу, меншими експлуатаційними витратами.

Тарілка виглядає як плоский лист товщиною 2,5—6 мм, що складається з окремих секцій укріплених на опорному кільці і балках каркаса перекриває весь переріз колони. Щілини тарілок роблять штампуванням або фрезеруються, ширина щілини 3-8 мм і довжина 60 і 200 мм для проходу рідиної та газовой(паровой) фаз, площа яких становить від 10 до 30% площі всієї тарілки. На суміжних тарілках щілини розташовані взаємно перпендикулярно. Тарілками розміщуються на відстані від 300 до 600 мм. Тарілки діаметром до 800 мм виготовляються з цілого листа. Тарілки великого діаметру виготовляються з секцій, ширина яких приймається такою, щоб монтаж тарілок здійснювався через люк.

у тарілки відсутні будь які переливні пристрої, рідина стікає з тарілки на тарілку через ті жеотвори, через які проходить пар. При нормальній роботі тарілки місця стоку рідини і барботажа пара розташовуються рівномірно по всьому перерізу тарілки. Межа стійкої роботи тарілки чутливості до коливань навантаження, а також забруднень і опадом, які швидко забруднюють отвори тарілки, відповідає таким навантаженням пара і рідини, при яких здійснюється максимально інтенсивний контакт і висока ефективність поділу.

3.1.Застосування тарілок провального типу

Тарілки провального типу застосовуються в нафто-хімічній, хімічній, та харчовій промисловостях. [1 – 6]

Тарілки провального типу прості за конструкцією та легкі у виготовленні, мають малуметалоємність, що значно зменшує витрати на їх виготовлення. Дуже зручні в експлуатації.

Тарілки провального типу зручно і доцільно застосовувати забрудненою середовищі. Це доцільно тим, що в апаратах можна застосовувати тарілки з великими отворами діаметри яких досягають до 120 мм, що дозволяє усунути проблему з можливим забрудненням отворів.

При виборі конструкції контактної пристрою враховують як їх гідродинамічні і масообмінні характеристики, так і економічні показники роботи колони при використанні того чи іншого типу контактних пристроїв. При виборі типу контактних пристроїв зазвичай керуються наступними основними показниками:

- а) продуктивність;
- б) гідравлічним опором;
- в) коефіцієнтом корисної дії;
- г) діапазон робочих навантажень;
- д) можливістю роботи на середовищах, схильних до утворення смолистих чи інших відкладень;
- е) матеріаломісткістю;
- ж) простотою конструкції, зручністю виготовлення, монтажу і ремонту.

Розглянуто досвід впровадження тарілок провального типу в нафтохімічній промисловості, як за кордоном, так і в країнах колишнього СРСР. Широке впровадження в промисловість тарілок провального типу за кордоном почалося з 1950 року. Тарілки провального типу використовувалися в основному для заміни ковпачкових тарілок в різних нафтохімічних виробництвах. Діаметри промислових колон становили від 0,6 до 3,2 м.

Наприклад наведені результати роботи з впровадження тарілок провального типу на бражної колоні Ацетонуобутилове виробництва з діаметром 2 м. Бражна колона до переобладнання мала 24 сітчатие тарілки при відстані між ними 0,51 м. Продуктивність колони по бражці становила 40 м³ / год.

В роботі повідомляється, що сітчатие тарілки були замінені на гратчасті тарілки провального типу з вільним перетином 15,4%, ширина прямокутних отворів становила 0,004 м. У колоні були встановлені 25 тарілок провального типу з відстанню між тарілками 0,51 м. Після переобладнання колони продуктивність по бражці зросла до 100 м³ / год при тих же умовах роботи, що і до переобладнання.

У роботі зроблені наступні висновки, що:

- при необхідності збільшити продуктивність бражної колон можна рекомендувати заміну ковпачкових і сітчатие тарілок на тарілки провального типу, що сприятиме збільшенню продуктивності колон в 2 рази;
- при будівництві нових бражної колон необхідно їх постачати тарілками провального типу, що дозволить отримати економію металу на їх виготовлення, спростити конструкцію тарілок і полегшити їх ремонт.

А також на абсорбції аміаку и діоксиду вуглецю з газів содового виробництва в останні роки для поглинання аміаку и діоксиду вуглецю розроблення абсорбер з противоточного трубно-гратчастімі и гратчастімі Контактна елементами. Верхня частина абсорбера забезпечен чотірма противоточного сітчастімі тарілками з вільним з вільним перетин 0,15-0,25 м² / м² (15-25% вільного перетин) и однієї Типової розподільної тарілкою, призначеної для рівномірного розподілу Рідини по всьому перетин апарату.

Роблячі Висновок з наведених приміров

- збільшення в рази продуктивності апаратів без зміни або зі зменшенням їх габаритів при зниженні питомих витрат енергоресурсів на реалізацію процесу десорбції;

- збільшення в 2-3 рази пробігу апаратів між чистками;

- застосування простих по конструкції контактних пристроїв, що дозволяють здійснити їх монтаж і демонтаж без розбирання колон;

- зниження гідравлічного опору колон;

- скорочення трудовитрат на чистку апаратів за рахунок використання контактних елементів більш простої конструкції.

3.2. Режими роботи тарілок провального типу

К важливою характеристики роботи тарілок провального типу можна виднести діапазон їх стійкої роботи. Тарілки провального типу можуть працювати при великих навантаженнях по газовій і рідкій фазі, але у відносно вузькому діапазоні їх зміни. Діапазон сталої роботи тарілок пов'язаний з гідродинамічними режимами їх роботи, які змінюють один одного при зміні співвідношення між фазами. Режими роботи тарілок провального типу описувалися в роботах багатьох вчених [1-5].

З цими характеристиками пов'язані режими праці тарілки провального типу, які виникають при збільшенні швидкості газу (пари) в перерізі колони .

В роботі [1] ці режими відображені на графіку залежності гідравлічного опору тарілок провального типу від швидкості газу (пари) в перерізі колони (рис. 3) і визначені наступним чином:

- режим змоченою тарілки (I) існує при малих швидкостях пари (газу). Контакт пари і рідини відбувається на поверхні, що стікають з тарілок крапель і струменів рідини. Цей режим не є робочим;

– барботаажний режим (II) спостерігається при збільшенні швидкості пара. На тарілці існує шар світлої рідини, через який барботирует пар і шар піни. При подальшому збільшенні швидкості пара висота шару світлої рідини зменшується, а висота шару піни збільшується;

– режим емульгування або аерації (III) характеризується тим, що шар світлої рідини майже повністю зникає. Натарелке з'являється сильно турбулізований шар піни. Цей режим також, як і режим (II), є робочим;

– хвильовий режим (IV) спостерігається при подальшому збільшенні швидкості пара. Рідина і піна на тарілці приходять в хвилеподібний рух;

«Захлебывание» настає при збільшенні швидкості пара, коли рідина і піна не стікають з тарілки, а викидаються на вышележащую тарілку.

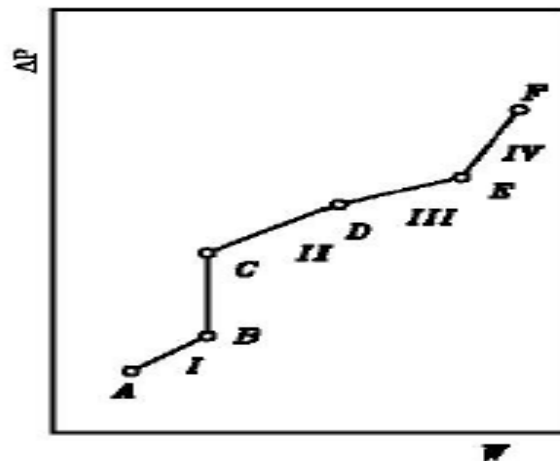


Рис.4. Графік залежності опору тарілок провального типу від швидкості пари:

I – IV – гідродинамічні режими роботи.

Точки B, C, D, E уявляють собою моменти переходу від одного режиму до іншого. Точка E визначає максимально допустиму швидкість пара в колоні.

В монографії [13] проведено огляд робіт по визначенню режимів роботи тарілок провального типу. Зазначається, що різні дослідники по-різному оцінюють візуальну картину, що спостерігається при тих чи інших режимах

на тарілках провального типу, і дають різні назви цим режимам. Зазначається, що перехід від одного режиму до іншого визначається гідродинамічними факторами (швидкостями газу та рідини), а також властивостями фаз і геометрії тарілки.

З розглянутих робіт можна зробити висновок, що різні автори по-різному оцінюють режими роботи тарілок провального типу. Немає єдиної термінології у визначенні режимів роботи тарілок. Необхідні подальші дослідження тарілок провального типу з метою уточнення гідродинамічних особливостей їх роботи.

3.3. Результати досліджень роботи тарілок провального типу та діапазон їх стійкої роботи

Це літературний огляд [19] для визначення меж роботи залежності мінімальної (w_{min}) та максимальної (w_{max}) швидкостей газу в перерізі колони від щільності зрошення L для тарілок з малим вільним перетином, встановлених в колонах різного діаметра проводилося на стендах гідравлічних випробувань у відповідності з таблицею 1.

Таблиця 1: геометричні параметри досліджених тарілок провального типу

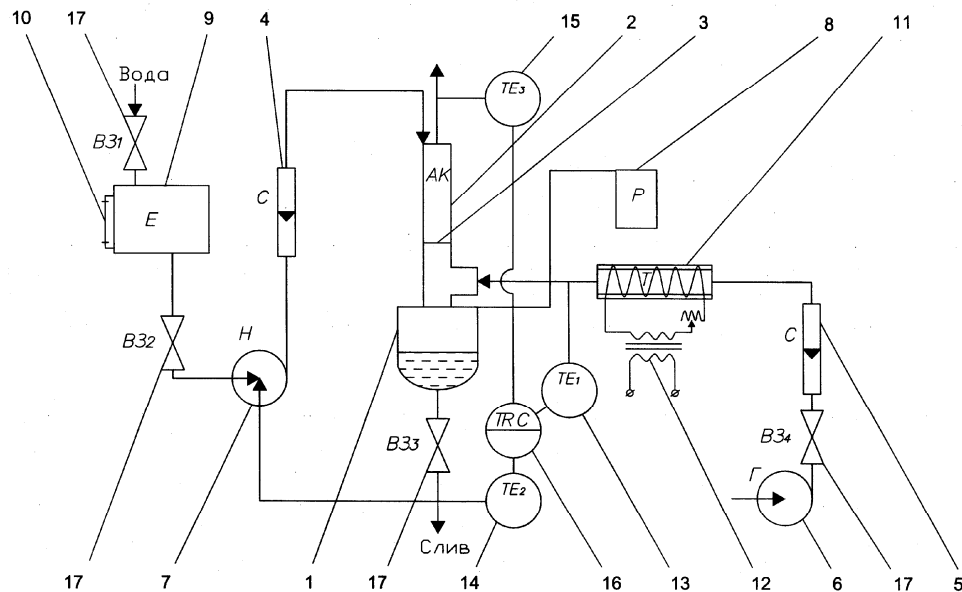
№ Тарелки	Діаметр колонны, D м	Свободное сечение, f %	Діаметр отверстия, d_0 м
1	2,0	16	0,012
2		25	0,012
3		36	0,012
4	0,4	16	0,012
5		36	0,012
6		56	0,012
7	0,3	16	0,008

8		36	0,012
9		56	0,012
10	0,15	16	0,008
11		16	0,012
12		19	0,012
13		22	0,012
14		25	0,012
15		30	0,012
16		36	0,012
17		46	0,007
18	0,057	15,5	0,002
19		14,6	0,005
20		15,8	0,008
21		17,7	0,012
22		16,3	0,013
23		15,8	0,016
24		16,3	0,023
25		24,9	0,002
26		25,4	0,005
27		26,6	0,012
28		24,1	0,0125
29		25,0	0,0285
30		36,1	0,002
31		36,0	0,005
32		35,6	0,012
33		36,9	0,020
34		35,5	0,024
35		35,6	0,034

Вигляд одної з установки для гідровлічних досліджень

Установка (рис.4) складається з куба колони (1) з встановленою на ньому колоною (2), в якій розміщували тарілку провального типу (3). Куб і колона були виготовлені зі скла. Висота скляної царги колони становила 0,95 м.

У колоні $D = 0,057$ м були досліджені тарілки № 18-35 (таблиця 1).



Мал. 5. Схема експериментальної установки для гідравлічних

і кінетичних досліджень тарілок провального типу

з колоною $D = 0,057$ м:

- (1) - куб колони; (2) - колона; (3) - тарілка провального типу;
- (4), (5) - ротаметри; (6) - повітрорудувка; (7) - насос; (8) - мікроманометр;
- (9) - бак; (10) - мірне скло; (11) - калорифер; (12) - автотрансформатор;
- (13) - (15) - термопары; (16) - потенціометр; (17) - вентилі (§ 1.-В34).



Мал. 6. експериментальна установка для гідравлічних і кінетичних досліджень тарілок провального типу $D=0.057$

За швидкість w_{\min} брали швидкість газу при $L = \text{const}$, при якій на тарілці провального типу з'являвся стійкий барботажний шар. При швидкості w_{\max} газожидкостний шар на тарілці починав руйнуватися. У колонних діаметром $D = 0,057$ і $0,15$ м газожидкостний шар при швидкості, що перевищує w_{\max} , починав різко зростати до виходу через верх колони. У колоні

$D = 2$ м, при збільшенні швидкості газу вище w_{\max} , через частину рідини на тарілці газ взагалі не барботіровал, а через іншу частину тарілки газ проходив з великою швидкістю. Кордон розділу газової і газорідної фази при w_{\max} , на тарілках провального типу з малим вільним перетином, була видна досить добре.

З графіків видно, що діапазон стійкої роботи ($w_{\min} - w_{\max}$) для тарілки провального типу встановленої в колоні з $D = 0,057$ м істотно (приблизно в 2 рази) менше, діапазону стійкої роботи тарілки встановленої в колоні $D = 2$ м,

при великій щільності зрошення . Значення вільних перетинів тарілок і діаметри отворів плато тарілки були близькі для колон різного діаметру.

На рис. 27 і 29 представлена структура барботажного шару характерна для висоти барботажного шару до $H \approx 0,1$ м.



Мал. 7. Робота тарілки провального типу в режимі однорідного барботажного шару: тарілка № 21 (таблиця 11),

$$L = 13,5 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{год}), w = 0,56 \text{ м} / \text{с}.$$



Мал. 8. Робота тарілки провального типу в режимі однорідного барботажного шару: тарілка № 10 (таблиця 11),
 $L = 12,7 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$, $w = 0,72 \text{ м / с}$.

Як видно з малюнків, барботажний шар характеризується однорідною за всіма напрямками структурою ячеистої піни, горизонтальною поверхнею барботажного шару, висота якої не змінюється в часі, для одних і тих же швидкостей газової і рідкої фаз. Це говорить про те, що в барботажному шарі сили тяжіння перевищують сили інерції рідини. Можна вважати, що барботажний шар в цьому режимі, як система, що самоорганізується, знаходиться в рівновазі, так як сили гідростатичного тиску і масові сили

постійні у часі в будь-якій точці барботажного шару. Вектор швидкості руху рідини має один напрямок - зверху вниз. Так як на газожидкостній шар не діють зовнішні сили, а діють тільки сили, в результаті яких він утворений, то таку систему можна назвати самоорганізується. Крім того, барботажний шар практично симетричний щодо осей координат, початок яких розташовується на центральній вертикальній осі тарілки провального типу.

При досягненні висоти газорідинного шару більшої $H \approx 0,1$ м він втрачає стійкість (рис. 8, 9).



Мал. 9. Робота тарілки провального типу в режимі рухомого газорідинного шару: тарілка № 21 (таблиця 1),

$$L = 13,5 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{год}), w = 1,44 \text{ м} / \text{с}.$$



Мал. 10. Робота тарілки провального типу в режимі рухомого газорідного шару: тарілка № 10 (таблиця 1),

$$L = 12,7 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{год}), w = 0,83 \text{ м} / \text{с}.$$

Утворюється рухливий газожидкостний шар, який характеризується відсутністю структурованої ячеистої піни. Вільна поверхня газорідного шару криволинейная. Її висота змінюється в часі для одних і тих же швидкостей газової і рідкої фаз має амплітуду і частоту. У газорідному шарі спостерігаються флуктуації таких параметрів як гідравлічне опір і висота газорідного шару, швидкостей руху рідини, які мають хаотичне напрям. Це говорить про те, що сили інерції рідини в такому газорідному шарі перевищують сили тяжіння.

Крім цього, газорідинної шар втрачає симетричність щодо осей координат, початок яких розташовується на центральній вертикальній осі тарілки провального типу.

Таким чином, газорідинної шар, як система, що самоорганізується, втрачає стійкість і стає динамічною нерівноважною системою. Перехід від стійкої рівноважної самоорганізується ізольованої системи до нерівноважної системи називають бифуркацією

ВИСНОВКИ

- газорідинної шар на тарілці провального типу, відповідно до основними поняттями синергетики, можна розглядати, як систему, що самоорганізується, яка при певних навантаженнях по газу рідини, переходить з рівноважного стану в нерівноважної стан, що визначає режими роботи тарілки.

- максимально ефективна робота тарілок провального типу спостерігається в режимі рухомого газорідинного шару;

3.4. Розрахунок режимів роботи тарілок

Критичну точку переходу від режиму емульгування до хвильовому режиму (рис 3), тобто точку Е, Ю. Р. Зелінський [16] пропонує знаходити по рівнянню

$$\lg \left(\frac{\omega^2}{g F_c^2 a} \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_{жс}} \cdot \mu_{жс}^{0,16} \right) = 0,04 \frac{D}{a} - 1,75 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\gamma_c}{\gamma_{жс}} \right)^{1/8} \quad (1)$$

де ω – швидкість пара для повного перерізу колони в точці Е, м/сек²

g – прискорення сили тяжіння, м/сек²

F_c – живе перетин, м²/м²

a – ширина щілини, м

γ_z і $\gamma_{ж}$ – питома вага відповідно газу і рідини, кг/м³

$\mu_{ж}$ – в'язкість рідини, спз

D – діаметр колони, м

L і G – навантаження по рідині і газу, кг/м².сек

Це уравненеи дозволяє визначити максимальну допустиму швидкість і вибирати робочу швидкість в колоні.

Аналогічна формула запропонована для точок В-С (підвисання)

$$\lg\left(\frac{\omega^2}{gF_c^2 a} \cdot \frac{\gamma_z}{\gamma_{ж}} \cdot \mu_{ж}^{0,16}\right) = 1 - 2,45 \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_{ж}}\right)^{1/8} \quad (2)$$

А. Р. Касаткіним та ін [17]. Останній метод базується на кореляції двох комплексних величин X і Y . В кожному з цих величин входять параметри, що визначають роботу провальною тарілки:

Для визначення залежності граничних швидкостей в колоні з тарілками провального типу від різних чинників був побудований графік (рис. 11.), аналогічний запропонованому раніше для визначення граничних швидкостей в колонах з масообмінними насадками.

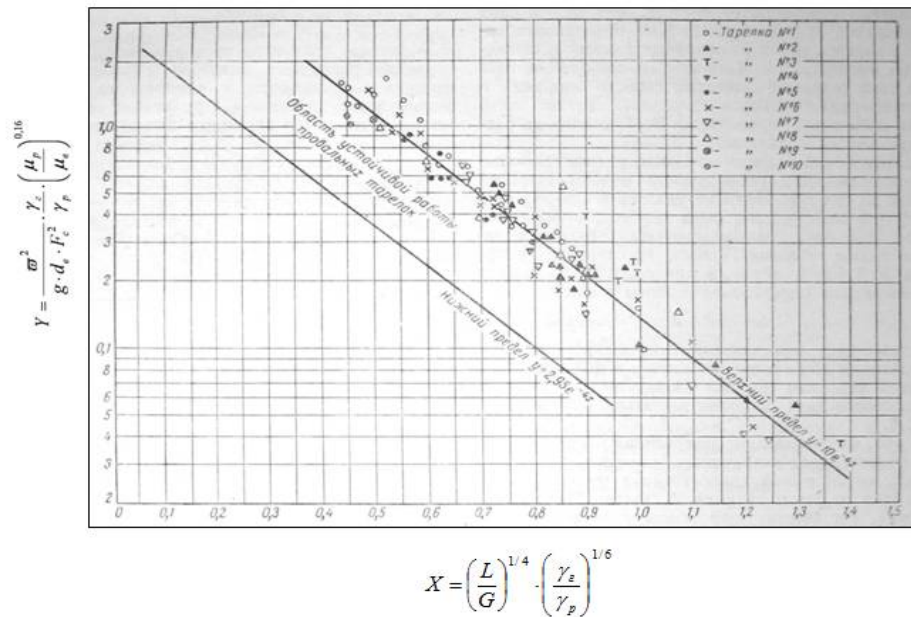


Рис. 10 Залежність граничної швидкості газу (пара) (швидкості захлинання) в колонах з тарілками провального типу від відношення вагових швидкостей потоків, їх фізичних властивостей і визначальних розмірів тарілок ($D_k = 0,075$ і $0,240$ м, $f = 0,13 - 0,4$)
На осі абсцис нанесений комплекс

$$X = \left(\frac{L}{G}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_p}\right)^{1/6} \quad (3)$$

а на осі ординат комплекс

$$Y = \frac{\sigma^2}{g \cdot d_e \cdot F_c^2} \cdot \frac{\gamma_g}{\gamma_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g}\right)^{0,16} \quad (4)$$

де: L і G – вагові швидкості рідини і газу (пара), $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$;

γ_g і γ_p – питомі ваги газу (пара) і рідини, $\text{кг}/\text{м}^3$;

g – прискорення сили тяжіння, $\text{м}/\text{с}^2$;

d_e – еквівалентний діаметр щілини (отвору в тарілці), м;

F_c – вільний переріз тарілки, $\text{м}^2/\text{м}^2$;

μ_p – густина рідини, *сп*;

μ_v – густина води при 20°, *сп*.

Досліджуючи тарілки з живим перерізом, рівним від 0,13 до 0,4 при діаметрі отворів від 3 до 8,4 мм, автори [17, 18] знайшли, що робоча зонатарілок знаходиться між двома прямими лініями.

Відношення L/G в дослідах мінялося від 2,5 до 148, а швидкість – газу від 0,20 до 3,78 *м/с*. Гранична швидкість газу, або швидкість захлинання, ω , *м/с*, визначалася візуально по різкому зростанню висоти піни на тарілці і по різкому збільшенню опору тарілки.

Для перевірки отриманих результатів на графік були нанесені також дослідні дані інших авторів. Як випливає з графіка, точки, які відповідають отриманим даним про швидкості захлинання на тарілках провального типу, отримані на чотирьох системах газ – рідина а також дані інших авторів для систем пар – рідина досить задовільно укладаються на одній прямій (у напівлогарифмічних координатах), яка описується рівнянням

$$Y = 10 \cdot e^{-4x}, \quad (5)$$

де: e – основа натуральних логарифмів.

Таким чином, за рівнянням (5) можна визначити граничну швидкість газу (пари), Проте робоча швидкість має бути вибрана декілька нижчою розрахованої за рівнянням (5), оскільки у виробничих умовах можливе збільшення швидкості вище граничної, що приведе до порушення режиму роботи апарату. Нижня межа роботи тарілок провального типу обумовлюється повним зливом рідини з тарілок. Значення цієї швидкості може бути визначене на підставі дослідних даних, представлених нижньою похилою прямою (рис. 10). Ця пряма має однаковий нахил з прямою для верхньої межі роботи (захлинання) тарілок і задовольняє рівнянню

$$Y = 2,95 \cdot e^{-4x} \quad (6)$$

У роботі [19] були проведені гідравлічні дослідження роботи тарілок провального типу в широкому діапазоні зміни вільного перерізу тарілок від $f = 16$ до 36% на колонах різного діаметру $D = 0,057, 0,15, 0,4$ і $2,0$ м. Діаметр отворів тарілок в колоні $D = 0,057$ м складав $d_0 = 0,005$ м. В решті колон – $d_0 = 0,012$ м. Навантаження по рідині змінювалися в межах $L = 4 - 150 \frac{m^3}{m^2 \cdot год}$, швидкість газу в перерізі колони досягала $w = 4$ м/с. Були також проведені гідравлічні і кінетичні дослідження тарілок провального типу на стенді з колоною $D = 0,3$ м при ректифікації системи метанол-вода (50 мол. %). На стенді з колоною $D = 0,15$ м досліджували масообмін при десорбції двоокису вуглецю з води азотом. На стенді з колоною $D = 0,057$ м вивчали теплообмін у барботажному шарі між нагрітим повітрям і водою.

У процесі досліджень вимірювали гідравлічний опір тарілок, висоту барботажного шару і ефективність тарілок при різних співвідношеннях між газовою і рідкою фазою.

Було встановлено три гідродинамічні режими роботи тарілок провального типу:

- режим однорідного барботажного шару;
- режим рухомого газорідинного шару;
- режим руйнування газорідинного шару.

Режим рівномірного барботажу характеризується однорідною по всіх напрямках структурою чарункуватої піни, горизонтальною вільною поверхнею барботажного шару, висота якої не змінюється в часі для одних і тих самих швидкостей газової і рідкої фаз. Це говорить про те, що в барботажному шарі сили тяжіння перевищують сили інерції рідини.

При висоті барботажного шару $H = 0,08 - 0,1$ м настає режим рухомого барботажного шару, який характеризується відсутністю

структурованої чарункуватої піни, криволінійною вільною поверхнею барботажного шару. Локальні висоти вільної поверхні барботажного шару змінюються в часі, мають амплітуду і частоту для одних і тих самих швидкостей газової і рідкої фази.

Режим руйнування газорідного шару характеризується руйнуванням барботажного шару.

В роботі експериментально встановлено, що режим рухомого барботажного шару починається при висоті барботажного шару $H = 0,8 - 0,1$ мм, коли рідинна фаза барботажного шару є суцільною, а газова (парова) – дисперсною. Перш за все це стосується тарілок провального типу звичайного вільного перерізу (до 25%).

У роботі робляться наступні висновки:

- максимальна ефективність тарілок провального типу досягається при режимі рухомого барботажного шару;

- режим рухомого барботажного шару починається при висоті барботажного шару $H = 0,08 - 0,1$ мм для всіх досліджених тарілок провального типу і навантажень по газу і рідині, коли рідинна фаза барботажного шару є суцільною, а газова (парова) – дисперсною;

- початок максимально ефективної роботи тарілок провального типу необхідно вважати тоді, коли настає режим рухомого барботажного шару.

Автори зробили розрахунки з написаних вище рівнянь та отримали результати у вигляді графіків

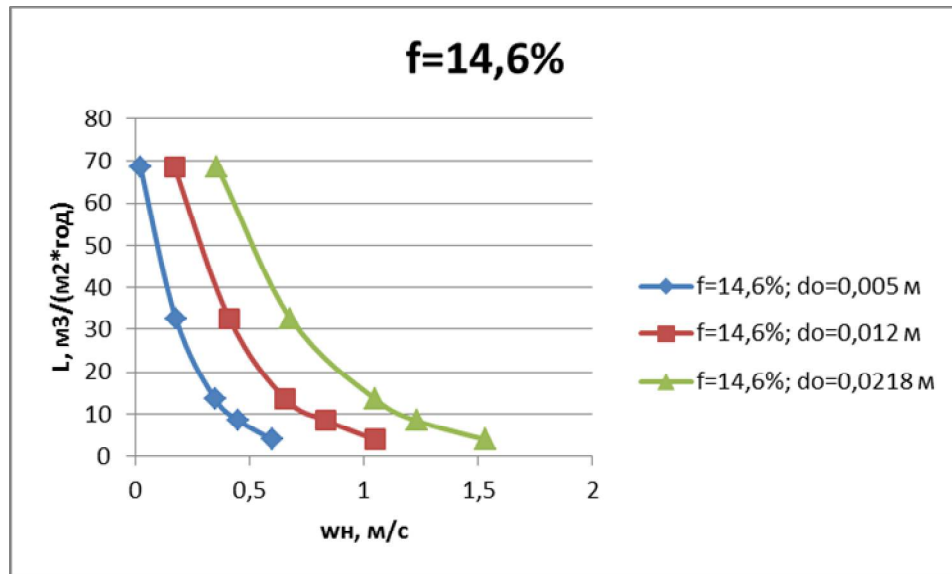


Рис. 12 Залежність $w_n = f(L)$ для тарілок провального типу з вільним перерізом $f = 14,6\%$ і різним діаметром отворів.

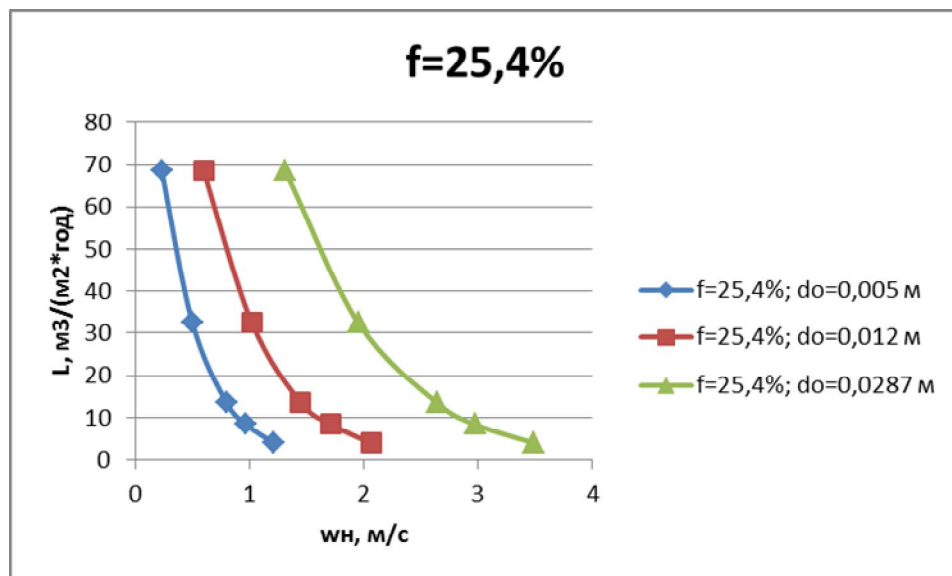


Рис. 13 Залежність $w_n = f(L)$ для тарілок провального типу з вільним перерізом $f = 25,4\%$ і різним діаметром отворів

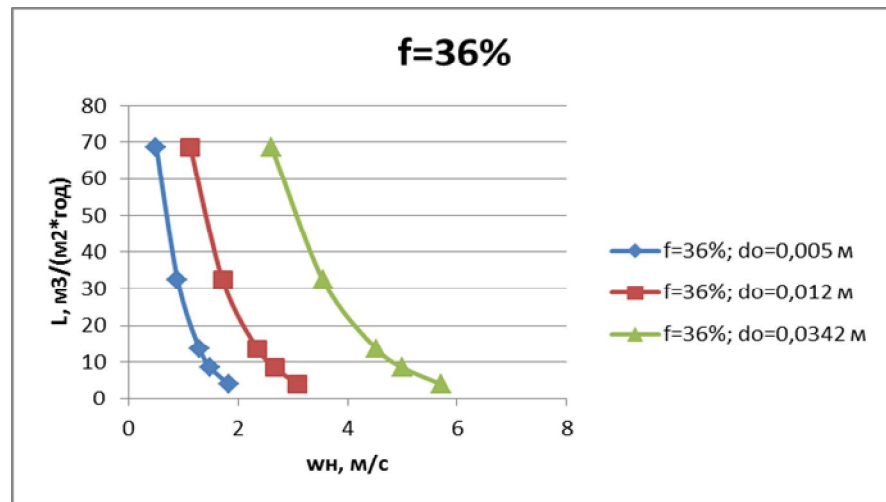


Рис. 14 Залежність $w_n = f(L)$ для тарілок провального типу з вільним перерізом $f = 36\%$ і різним діаметром отворів

За нижню межу роботи тарілок провального типу, на підставі літературних даних [19], приймаємо швидкість газу у перерізі колони, що відповідає початку режиму рухомого барботажного шару на тарілках провального типу (точці біфуркації).

- L – щільність зрошування, м³/(м²·год);
- w_n – швидкість газу в повному перерізі колони, що відповідає нижній межі роботи тарілок провального типу, м/с.

З отриманих графіків, автори зробили наступні висновки:

1. Існуючі у літературних джерелах рівняння для розрахунку діапазону стійкої роботи тарілок провального типу не можуть бути застосовані для тарілок діаметром $D = 0,057$ м.
2. Нижня межа роботи тарілок провального типу суттєво залежить від діаметра отворів в плато тарілки для одного і того самого вільного перерізу.
3. Для розрахунку $w_n = f(L)$ можна використовувати рівняння (8) з середньою відносною похибкою $A = 9\%$, яка є доброю.
4. Наші експериментальні дані не підтвердили розрахункові дані з цієї роботи. Вони показали значно меншу залежність меж роботи від діаметрів отворів. Тому необхідно провести подальше дослідження на лабораторних установках.

4. Теорія масштабного переходу

В останні роки було сформульовано нову теорію масштабного переходу [24]. Вона виявилася гідродинамічної, зумовленої нерівномірністю розподілу потоків і співвідношення фаз по перерізу промислових апаратів, посиленням поздовжнього перемішування при збільшенні розмірів, що визначають масштаб турбулентності або виникнення циркулюючих контурів. Ці ефекти характеризують структуру потоків, в більшості випадків не моделюються на малих апаратах та при сучасному рівні розвитку гідродинаміки потоків не можуть бути передбачені методом математичного моделювання. Однак оскільки масштабний ефект має гідродинамічну природу, його можна усувати на гідродинамічних стендах без технологічних випробувань. [25, 26], забезпечивши шляхом конструктивних заходів зменшення гідродинамічних неоднорідностей і необхідну структуру потоків у великому апараті. Такий спосіб розробки промислових апаратів, названий гидромоделированием, що дозволяє істотно прискорити і здешевити перехід від лабораторних установок до промислових.

В даний час розроблена наближена теорія масштабного ефекту [25,27,28], що полегшує пошук конструктивних заходів для усунення, а так само залишкових неоднорідностей з метою визначення ефективності промислових апаратів, без технологічних випробувань.

Зменшення ККД спостерігалось і для провальних барботажних тарілок (майже в 3 рази при збільшенні діаметра від 0,8 до 5 м.) [29, 30]

Теорія масштабного переходу в гідродинамічних характеристиках колони, як малого, так і великого діаметру встановлює зв'язок між параметрами колон різного діаметра.

Проводять експерименти в колонах малого діаметра і встановлюється зв'язок між гідравлічними параметрами колон малого діаметра з гідравлічними параметрами колон великого діаметра. Далі проводяться

технологічні випробування масої теплообміну. За даними гідродинамічним моделюванням, технологічні параметри, отримані в колонах малого діаметра, переносяться на колони великого діаметру з досвідчених установок.

Дуже важливий висновком є те, що низька ефективність багатьох промислових апаратів є наслідком дефектів конструкції апаратів, які можуть бути усунені, а КМП при цьому може бути наближений до одиниці. Також теорія масштабного переходу ґрунтується на тому, що при розрахунку колонного апарата ми повинні обов'язково використовувати експериментальні установки з колонами не великого діаметру і за результатами досліджень цих установок, ми повинні використовувати при розрахунку промислових апаратів.

В работе [8] было предложено уравнение (1) для расчета точки бифуркации барботажного слоя на тарелках провального типа.

$$\lg\left(\frac{Y}{T^{0,5}}\right) = 0,0751 - 1,68 \cdot X \quad (1)$$

В уравнение (1) входит коэффициент T , который представляет собой отношение суммы периметров всех отверстий плато тарелки к ее диаметру [6]. Таким образом параметр T является функцией таких геометрических параметров тарелки провального типа, как ее диаметр, свободное сечение и диаметр отверстий плато тарелки. Это дает возможность по уравнению [8] рассчитывать свободное сечение тарелок провального типа по заданной скорости, рассчитанной на полное сечение колонны, для различных диаметров колонны. Это дает возможность гидродинамического моделирования тарелок провального типа с различными геометрическими характеристиками [8].

5. Розрахунок вільного перерізу тарілки провального типу $D = 3.8$ м

Визначаємо вільний переріз тарілок провального типу в колонні $D = 3,8$ м

Розрахунок проводиться за формулою (7)

$$\lg\left(\frac{Y}{T^{0,5}}\right) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

$$X = \left(\frac{G_p}{G_n}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_p}\right)^{1/8} \quad (1)$$

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_e}\right)^{0,16} \quad (2)$$

$G_{рід}$ і $G_{п}$ – вагові швидкості рідини і газу (пара), кг/год;

$$G_{рід} = G_{п} = (G_{ф} + G_{н})/2$$

$$G_{рід} = 288,88 \text{ кг/с.}$$

$$G_{п} = G_y = 50,02 \text{ ,кг/сек}$$

$G_{ф}$ – кількість флегми, кг/год;

G_{f} – кількість вихідної суміши, кг/год;

$G_{н}$ – кількість рідини, що проходить крізь низ колони, кг/год;

$\rho_{рід}$ і $\rho_{п}$ – питомі ваги газу (пара) і рідини, кг/м³;

g – прискорення сили тяжіння, м/с²;

d_0 – діаметр отворів в тарілці, м;

f – вільний переріз тарілки, м²/м²;

$\mu_{рід}$ – в'язкість рідини, Па·с;

μ_e – в'язкість води при, 20°, Па·с;

V – витрата пари, $\text{м}^3/\text{с}$;

a, B – коефіцієнти;

L – щільність зрошення, $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{год})$;

S – площа колони, м^2

D – внутрішній діаметр колони, м ;

Σ – площа суми отворів, м^2 ;

S_0 – площа отвору, м^2 ;

N – кількість отворів, шт;

Π – периметр отворів, м

T – коефіцієнт

$a = -1,68$;

Розраховуємо щільність зрошення, $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{год})$;

$$L = V / S \quad (3)$$

$$L = 1040 / 11.34 = 91.71 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ год})$$

Визначаємо розрахункові параметри

Вагова швидкість рідини розраховується за рівнянням

За рівнянням (1) розраховується перша інтеграція при $f = 0,06\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

де Y розраховується за формулою (48)

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_e}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

де w – рекомендована швидкість пари у колоні

$$w = 0,3$$

ρ_p – питома вага рідини, кг/м^3 ;

$$\rho_p = 1000 \text{ кг/м}^3;$$

ρ_g – питома вага газу (пара), кг/м^3 ;

$$\rho_g = 13,94 \text{ кг/м}^3;$$

g – прискорення сили тяжіння, м/с^2 ;

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2;$$

d_0 – діаметр отворів в тарілці, м;

$$d_0 = 0,012 \text{ м}$$

μ_p – в'язкість рідини, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

$$\mu_p = 0,3467 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с};$$

μ_g – в'язкість МСА при 20° , $\text{Па}\cdot\text{с}$;

$$\mu_g = 1,115 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с};$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,06^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 2,421$$

T – коефіцієнт, який розраховується за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D} \quad (4)$$

де $\sum \Pi$ – сумарний периметр отворів, м

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n \quad (5)$$

де Π – периметр отворів, м

$$\Pi = \pi \cdot d_0 \quad (6)$$

$$\Pi = \pi d_0 = 3,14 \cdot 0,012 = 0,0376, \text{ м}$$

Розраховуємо площу всіх отворів, м²

$$S_0 = S \cdot f \quad (7)$$

де – S площа колони, м²

$$S = 0,785 \cdot D^2 \quad (8)$$

$$S = 0,785D^2 = 0,785 \cdot 3,8^2 = 11,34 \text{ м}^2$$

$$S_0 = 0,06 \cdot 11,34 = 0,68, \text{ м}^2$$

Розраховуємо площу одного отвору, м²

$$S'_0 = \pi \cdot R^2 \quad (9)$$

$$S'_0 = \pi \cdot R^2 = 3,14 \cdot 0,006^2 = 0,000113 \text{ м}^2$$

Розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S'_0} \quad (10)$$

$$n = \frac{0,68}{0,000113} = 6018,8 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 6018,8 = 226,31 \text{ м}$$

$$T = \frac{226,3}{3,8} = 59,55$$

За рівнянням розраховуємо x

$$X = \left(\frac{G_\phi}{G_n} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_p} \right)^{1/8}$$

$$X = 0,91$$

$$Lg(2,421/59.55^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0.91$$

$$-0,5 = -1,45$$

$$\Delta = 0,95$$

За рівнянням (1) розраховується друга інтеграція при $f = 0,08\%$

$$Lg(Y/T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,08^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 1,36$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою (57)

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, м²

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 11,34 \cdot 0,08 = 0,91, \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S'_0}$$

$$n = \frac{S_0}{S'_0} = \frac{0,91}{0,000113} = 8028,32 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 8028,32 = 301,86 \text{ м}$$

$$T = \frac{301,86}{3,8} = 79,43$$

$$Lg(1,39 / 79,43^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,91$$

$$-0,81 = -1,45$$

$$\Delta = 0.64$$

За рівнянням (1) розраховується третя інтеграція при $f = 0,1\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,1^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0.87$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, м^2

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 11,34 \cdot 0,1 = 1,134, \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S'_0}$$

$$n = \frac{S_0}{S'_0} = \frac{1,134}{0,000113} = 10035,4 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 10035,4 = 377,33 \text{ м}$$

$$T = \frac{377,33}{3,8} = 99,29$$

$$Lg(0,87 / 99,29^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,91$$

$$-1,07 = -1,45$$

$$\Delta = 0,38$$

За рівнянням (1) розраховується четверта інтеграція при $f = 0,16\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_s} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,16^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,34$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою (57)

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, м^2

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 11,34 \cdot 0,16 = 1,81, \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S'_0}$$

$$n = \frac{S_0}{S'_0} = \frac{1,81}{0,000113} = 16056,64 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 16056,64 = 603,72 \text{ м}$$

$$T = \frac{603,72}{3,8} = 158,87$$

$$Lg(0,34/158,87^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,91$$

$$-1,57 = -1,45$$

$$\Delta = 0,12$$

За рівнянням (1) розраховується п'ята інтеграція при $f = 0,2\%$

$$Lg(Y/T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_e}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,2^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,22$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, м²

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 11,34 \cdot 0,2 = 2,27, \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S'_0}$$

$$n = \frac{2,27}{0,000113} = 20088,5 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 20088,5 = 755,32 \text{ м}$$

$$T = \frac{755,32}{3,8} = 198,77$$

$$Lg(0,22 / 198,77^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,91$$

$$-1,8 = -1,45$$

$$\Delta = 0,35$$

За рівнянням (1) розраховується шоста інтеграція при $f = 0,25\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,25^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,14$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою (57)

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, м²

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 11,34 \cdot 0,25 = 2,84, \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S'_0}$$

$$n = \frac{2,84}{0,000113} = 25132,75 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 25132,75 = 944,99 \text{ м}$$

$$T = \frac{376,083}{3,8} = 248,68$$

$$Lg(0,14 / 248,68^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,91$$

$$-2,05 = -1,45$$

$$\Delta = 0,6$$

За рівнянням (1) розраховується сьома інтеграція при $f = 0,3\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,3^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,1$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, м²

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 11.34 \cdot 0,3 = 3,4, \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S'_0}$$

$$n = \frac{3,4}{0,000113} = 30106,2 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 30106,2 = 1131,99 \text{ м}$$

$$T = \frac{1131,99}{3,8} = 297,9$$

$$Lg(0,1 / 297,9^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,91$$

$$-2,22 = -1,45$$

$$\Delta = 0,77$$

За рівнянням (1) розраховується сьома інтеграція при $f = 0,35\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_e}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_e} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,35^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,07$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, м²

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 11.34 \cdot 0,35 = 3,97, \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S'_0}$$

$$n = \frac{3,4}{0,000113} = 335132,75 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 35132,75 = 1321 \text{ м}$$

$$T = \frac{1321}{3,8} = 347,63$$

$$Lg(0,07 / 347,63^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,91$$

$$-2,4 = -1,45$$

$$\Delta = 0,95$$

За рівнянням (1) розраховується сьома інтеграція при $f = 0,40\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0.3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,4^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,055$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою (57)

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, m^2

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 11,34 \cdot 0,4 = 4,54, m^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S_0'}$$

$$n = \frac{4,54}{0,000113} = 40177 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 40177 = 1510,65 \text{ м}$$

$$T = \frac{151,65}{3,8} = 397,55$$

$$Lg(0,055 / 347,55^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,91$$

$$-2,55 = -1,45$$

$$\Delta = 1,1$$

За рівнянням (1) розраховується сьома інтеграція при $f = 0,45\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_e}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,45^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,043$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, м²

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 11,34 \cdot 0,45 = 5,1, \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S'_0}$$

$$n = \frac{5,1}{0,000113} = 45159,3 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 45159,3 = 1698 \text{ м}$$

$$T = \frac{1698}{3,8} = 446,84$$

$$Lg(0,043 / 446,84^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,91$$

$$-2,7 = -1,45$$

$$\Delta = 1,25$$

За рівнянням (1) розраховується сьома інтеграція при $f = 0,5\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_e}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,5^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,0,035$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою (57)

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, m^2

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 11,34 \cdot 0,5 = 5,67, m^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S_0'}$$

$$n = \frac{5,67}{0,000113} = 50177 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 50177 = 1886,65 \text{ м}$$

$$T = \frac{1886,65}{3,8} = 496,49$$

$$Lg(0,035 / 496,49^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,91$$

$$-2,8 = -1,45$$

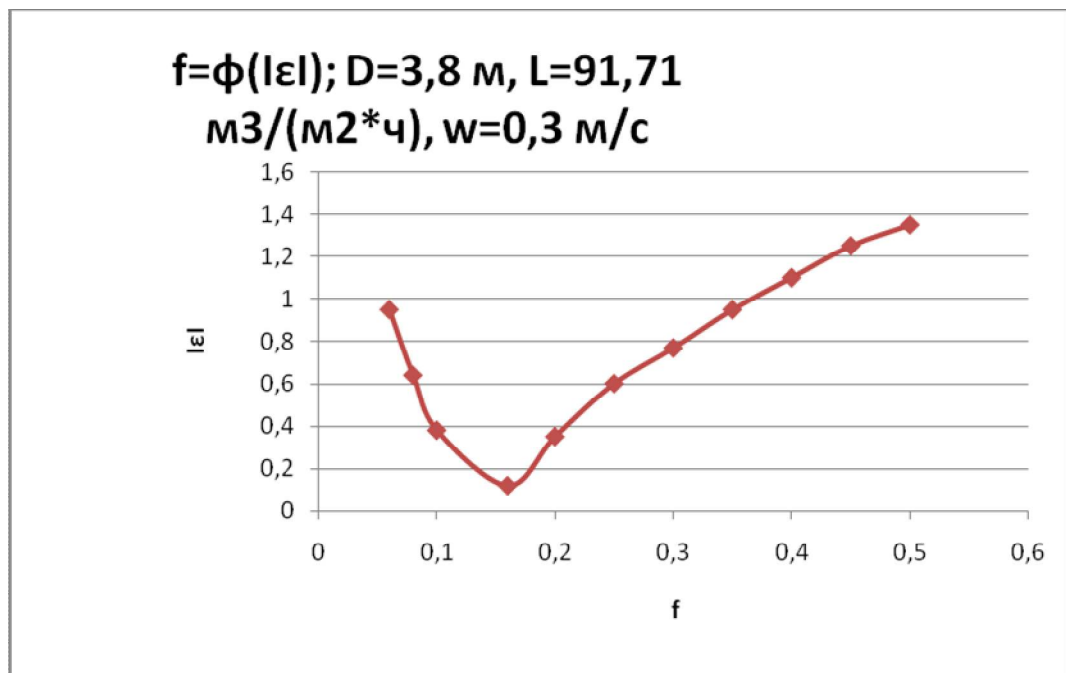
$$\Delta = 1,35$$

Таблиця № 2 Залежність величин Δ від вільного перетину f

f	0,06	0,08	0,1	0,16	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Δ	0,95	0,64	0,38	0,12	0,35	0,6	0,77	0,95	1,1	1,25	1,35

Рис. №15 Графік залежності Δ від вільного перетину f

в колонне $D = 3,8$ м



6. Розрахунок вільного перерізу тарілки провального типу $D = 0,057$ м

Приймаємо діаметр колони $D = 0,057$ м. та рекомендована швидкість пари у колоні $W = 0,3$ м/с

$$S = 0,785 \cdot D^2 = 0,785 \cdot 0,057^2 = 0,00255 \text{ м}^2$$

тоді

$$V = w \cdot 0,785 D^2 = 0,3 \cdot 0,785 \cdot 0,057^2 = 0,00076 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$G_n = V \cdot \rho_n$$

$$G_n = 0,0008 \cdot 11,34 = 0,009 \text{ кг/с}$$

Приймаємо щільність зрошування

$$L = 91,71, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год});$$

тоді кількість рідини в модельній колоні

$$G_p = L \cdot S$$

$$G_p = 91,71 \cdot 0,00255 = 0,24 \text{ м}^3/\text{год} \cdot 1000 = 240 \text{ кг/год} / 3600 = 0,065 \text{ кг/с}$$

$$\rho_p = 1000 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_n = 13,94 \text{ кг/м}^3;$$

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2;$$

$$d_0 = 0,012 \text{ м};$$

$$\mu_p = 0,3467 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\mu_g = 1,115 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$V = 0,000765 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$a = -1,68;$$

$$B = 1,188;$$

$$D = 0,057 \text{ м};$$

За рівнянням (1) розраховується восьма інтеграція при $f = 0,06\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

де Y – комплекс нанесений на осі ординат

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

де w – декомендована швидкість пари у колоні

$$w = 0,3$$

ρ_p – питома вага рідини, кг/м^3 ;

$$\rho_p = 1000 \text{ кг/м}^3;$$

ρ_z – питома вага газу (пара), кг/м^3 ;

$$\rho_z = 13,94 \text{ кг/м}^3;$$

g – прискорення сили тяжіння, м/с^2 ;

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2;$$

d_0 – діаметр отворів в тарілці, м;

$$d_0 = 0,012 \text{ м}$$

μ_p – в'язкість рідини, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

$$\mu_p = 0,3467 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

μ_g – в'язкість води при, 20° , $\text{Па} \cdot \text{с}$;

$$\mu_g = 1,115 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,06^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 2,42$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо периметр отворів, м

$$\Pi = \pi d_0 = 3,14 \cdot 0,012 = 0,0376, \text{ м}$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, м²

$$S_0 = S \cdot f$$

За формулою розраховуємо площу колони, м²

$$S = 0,785 \cdot D^2 = 0,785 \cdot 0,057^2 = 0,002551 \text{ м}^2$$

$$S_0 = S \cdot f = 0,002551 \cdot 0,06 = 0,000153 \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо площу одного отвору, м²

$$S'_0 = \pi \cdot R^2$$

$$S'_0 = \pi \cdot R^2 = 3,14 \cdot 0,006^2 = 0,000113 \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S'_0}$$

$$n = \frac{0,000153}{0,000113} = 1,354 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 1,354 = 0,0509 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,0509}{0,057} = 0,892$$

X – комплекс нанесений на осі абсцис

$$X = \left(\frac{G_p}{G_n} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_p} \right)^{1/8}$$

$$X = \left(\frac{0,07}{0,009} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{13,94}{1000} \right)^{1/8} = 0,98$$

$$Lg(2,451 / 0,892^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,98$$

$$0,413 = -1,57$$

$$\Delta = 1,17$$

За рівнянням (1) розраховується дев'ята інтеграція при $f = 0,08\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

де Y – комплекс нанесений на осі ординат

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,08^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 1,36$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, м²

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = S \cdot f = 0,002551 \cdot 0,08 = 0,000204 \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S_0'}$$

$$n = \frac{0,000204}{0,000113} = 1,806 \text{ шт}$$

$$\sum H = 0,0376 \cdot 1,806 = 0,0679 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,0679}{0,057} = 1,191$$

$$Lg(1,36 / 1,191^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,98$$

$$0,1 = -1,57$$

$$\Delta = 1,47$$

За рівнянням (1) розраховується десята інтеграція при $f = 0,1\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

де Y – комплекс нанесений на осі ординат

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_s} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,1^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,87$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою (57)

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, м²

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = S \cdot f = 0,002551 \cdot 0,1 = 0,0002551 \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S'_0}$$

$$n = \frac{0,0002551}{0,000113} = 2,257 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 2,257 = 0,084 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,084}{0,057} = 1,489$$

$$Lg(0,87 / 1,489^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,97$$

$$-0,15 = -1,57$$

$$\Delta = 1,42$$

За рівнянням (1) розраховується одинацята інтеграція при $f = 0,16\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

де Y – комплекс нанесений на осі ординат

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,16^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,155 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,34$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, m^2

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = S \cdot f = 0,002551 \cdot 0,16 = 0,00040816 \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S'_0}$$

$$n = \frac{0,00040816}{0,000113} = 3,612 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 3,612 = 0,135 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,135}{0,057} = 2,382$$

$$Lg(0,34 / 2,382^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,97$$

$$-0,66 = -1,57$$

$$\Delta = 0,91$$

За рівнянням (1) розраховується дванадцята інтеграція при $f = 0,2\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

де Y – комплекс нанесений на осі ординат

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,2^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,22$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою (57)

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, m^2

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = S \cdot f = 0,002551 \cdot 0,2 = 0,0005102 \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S_0'}$$

$$n = \frac{0,0005102}{0,000113} = 4,515 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 4,515 = 0,169 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,169}{0,057} = 2,978$$

$$Lg(0,22 / 2,978^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,97$$

$$-0,89 = -1,57$$

$$\Delta = 0,68$$

За рівнянням (1) розраховується тринадцята інтеграція при $f = 0,25\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

де Y – комплекс нанесений на осі ординат

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_e} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,25^2} \cdot \frac{13,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,005 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,151$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, m^2

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = S \cdot f = 0,002551 \cdot 0,25 = 0,00063775 \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S_0'}$$

$$n = \frac{0,00063775}{0,000113} = 5,643 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 5,643 = 0,212 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,212}{0,057} = 3,719$$

$$Lg(0,22 / 3,719^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,97$$

$$Lg(0,151 / 3,719^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,97$$

$$-1,06 = -1,57$$

$$\Delta = 0,51$$

За рівнянням (1) розраховується чотирнадцята інтеграція при $f = 0,3\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

де Y – комплекс нанесений на осі ординат

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_e}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_e} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,3^2} \cdot \frac{11,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,1$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, m^2

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = S \cdot f = 0,002551 \cdot 0,3 = 0,0007653 \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S'_0}$$

$$n = \frac{0,0007653}{0,000113} = 6,772 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 6,772 = 0,254 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,254}{0,057} = 4,467$$

$$Lg(0,1 / 4,467^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,97$$

$$-1,33 = -1,57$$

$$\Delta = 0,24$$

За рівнянням (1) розраховується чотирнадцята інтеграція при $f = 0,35\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

де Y – комплекс нанесений на осі ординат

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,3^2} \cdot \frac{11,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,07$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою (60) розраховуємо площу всіх отворів, m^2

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = S \cdot f = 0,002551 \cdot 0,35 = 0,0009 \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S'_0}$$

$$n = \frac{0,0009}{0,000113} = 7,96 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 7,96 = 0,3 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,3}{0,057} = 5,26$$

$$Lg(0,07 / 5,26^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,97$$

$$-1,52 = -1,57$$

$$\Delta = 0,05$$

За рівнянням (1) розраховується чотирнадцята інтеграція при $f = 0,4\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

де Y – комплекс нанесений на осі ординат

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,3^2} \cdot \frac{11,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,055$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, м²

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = S \cdot f = 0,002551 \cdot 0,4 = 0,0063 \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S_0'}$$

$$n = \frac{0,001}{0,000113} = 9,03 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 9,03 = 0,34 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,34}{0,057} = 5,95$$

$$Lg(0,055 / 5,95^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,97$$

$$-1,65 = -1,57$$

$$\Delta = -0,08$$

За рівнянням (1) розраховується чотирнадцята інтеграція при $f = 0,45\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

де Y – комплекс нанесений на осі ординат

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,3^2} \cdot \frac{11,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,043$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, m^2

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = S \cdot f = 0,002551 \cdot 0,45 = 0,0011 \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S_0'}$$

$$n = \frac{0,0011}{0,000113} = 10,16 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 10,16 = 0,38 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,38}{0,057} = 6,7$$

$$Lg(0,043 / 6,7^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,97$$

$$-1,8 = -1,57$$

$$\Delta = -0,23$$

За рівнянням (1) розраховується чотирнадцята інтеграція при $f = 0,5\%$

$$Lg(Y / T^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot X$$

де Y – комплекс нанесений на осі ординат

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_e}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{0,3^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,35} \cdot \frac{11,94}{1000} \cdot \left(\frac{0,3467 \cdot 10^{-3}}{1,115 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,035$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D}$$

Розраховуємо сумарний периметр отворів за формулою

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n$$

За формулою розраховуємо площу всіх отворів, m^2

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = S \cdot f = 0,002551 \cdot 0,5 = 0,0013 \text{ м}^2$$

За формулою розраховуємо кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_0}{S'_0}$$

$$n = \frac{0,0013}{0,000113} = 11,29 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,0376 \cdot 11,29 = 0,42 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,42}{0,057} = 7,44$$

$$Lg(0,035 / 7,44^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,97$$

$$-1,88 = -1,57$$

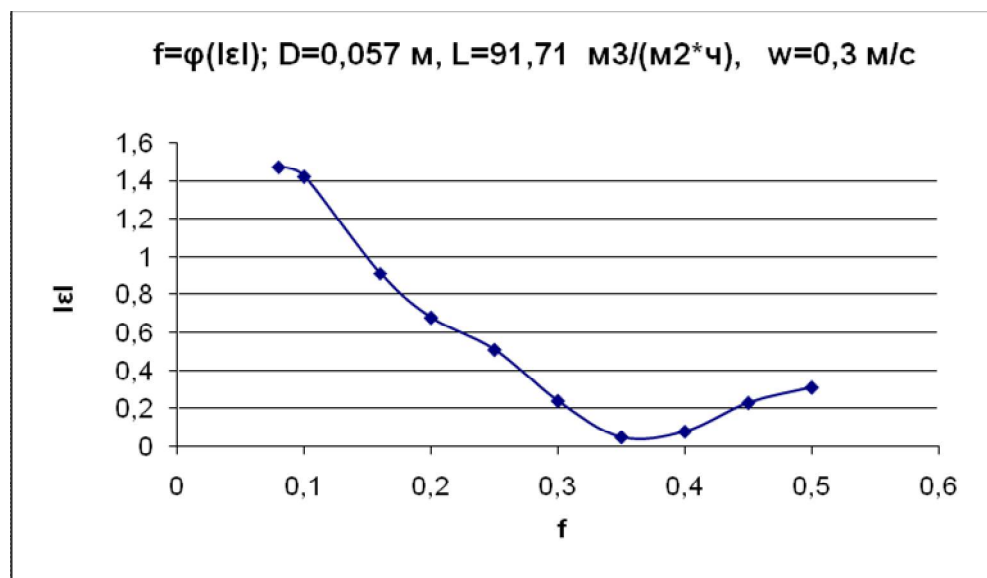
$$\Delta = -0,31$$

Таблиця №3 Залежність величин Δ від вільного перетину f

f	0,06	0,08	0,1	0,16	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Δ	1,17	1,58	1,42	0,91	0,68	0,43	0,24	0,05	0,08	0,23	0,31

Рис. №16 Графік залежності Δ від вільного перетину f

$$D = 0,057 \text{ м}$$



7. Опис експериментальних установок для кінетичних і гідравлічних досліджень тарілок провального типу з колонами $D = 0,057\text{ м}$.

7.1 Опис установки з колоною $D = 0,057\text{ м}$:

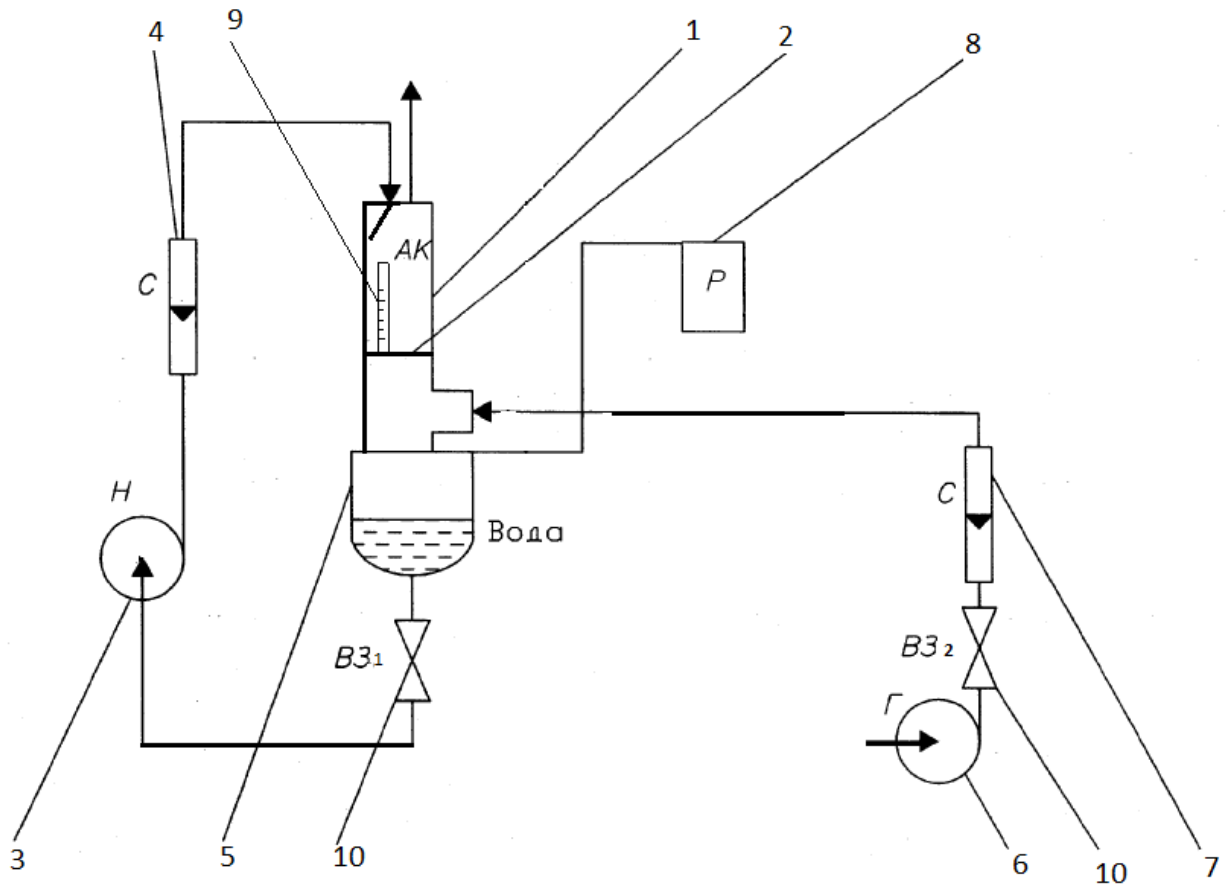


Рис. 17 Схема експериментальної установки для кінетичних і гідравлічних досліджень тарілок провального типу з колоною $D = 0,057\text{ м}$:

1 – колона; 2 – тарілка; 3 – насос; 4 – ротаметр; 5 – куб колони; 6 – газодувки; 7 – ротаметр; 8 – манометр; 9 – лінійка; 10 – вентелі.

7.2 Експериментальне дослідження

Рідина завдяки насосу (3) подається у верхню частину, по перерізу колони (1), для досягнення рівномірного розподілу рідини й таким чином зменшенням гідравлічного опору газу після тарілки рідина подається на стінку колони. По ротаметру (4) устанавлюємо витрату рідини, якій відповідає певна щільність зрошування.

Під тарілку (2) за допомогою завдяки (6) подаємо повітря. Його витрату керуємо по ротаметру (7), й для певної щільності зрошування змінюємо витрату повітря від початку роботи тарілки до її верхньої межі.

Для кожного співвідношення навантажень по газу й рідини вимірюємо гідравлічний опір дифманометром 8 і висоту піни лійкою 9. Особливу увагу приділяємо зміні режимів на тарілці: від режиму рівномірного барботажу до режиму не рівномірного газо-рідинного шару (точка біфуркації).

Гідравлічний опір тарілки вимірюємо за допомогою манометра, вхід якого з'єднаний з точкою відбору гідравлічного тиску, що розташовується під пасообмінною тарілкою. Вихід манометра з'єднаний з атмосферою.

Висоту піни вимірюємо за допомогою сантиметровою лінійки.

Для отримання більш точніших дослідних даних для кожного співвідношення навантажень по газу й рідині проводимо по декілька експериментів, після чого підраховується середня величина для гідравлічного опору та висоти піни.

7.3 Пуск колони

Подаємо напругу в мережу, після чого вмикаємо насос (1), відкриваємо кульовий кран (9), встановлюємо по ротаметру витрата рідини, який відповідає певній щільності зрошення. Потім вмикаємо газодувки (2). За допомогою рідинного дифманометра (3) виставляємо витрата газу. Витрати рідини й повітря регулюємо вентилями (6) і (19)

7.4 Зупинка колони

Вимикаємо насос(1), Вимикаємо газодувки (2), закриваємо вентиль закривають вентилі (6), вентиль (19) і шаровий кран (9).

8. Результати гідравлічних досліджень тарілок провального типу установки з колоною $D = 0,057$ м.

Таблиця №4 Дані експериментальних досліджень на колоні $D=0,057$ м.

Показання ротаметра РСПЗ по воде	Тип ротаметра	Показания ротаметра по воздуху	Гидравлическое сопр., мм. в. ст	Высота пены, мм	скорость газа, м/с
35 (90,00)	РС7	0	20	50	0,784
		5	22	70	0,942
		10	24	90	1,1
		15	26	110	1,27
		20	28	130	1,44
		25	28	150	1,625
		30	30	170	1,83
		35	32	180	1,96
		40	70	250	2,09

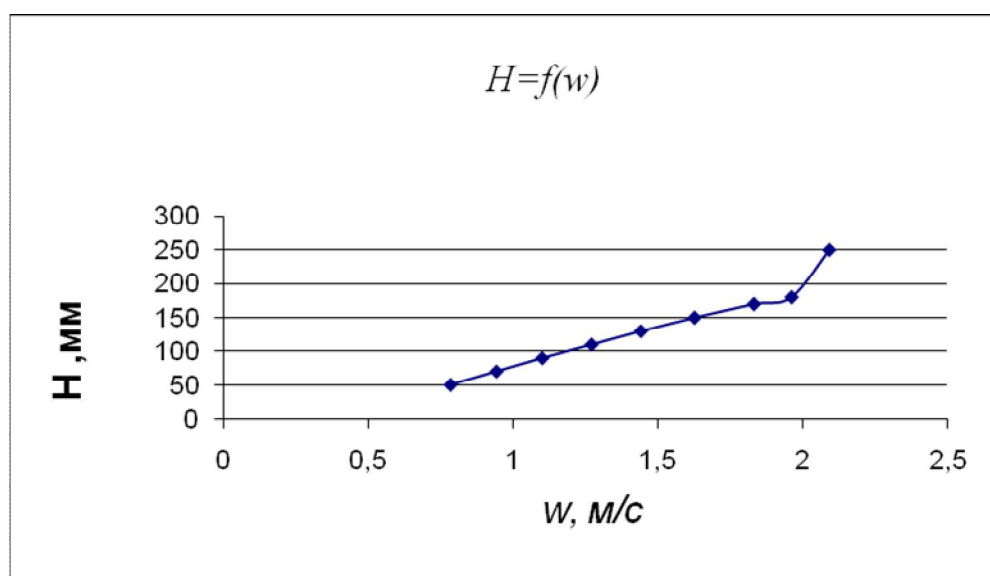


Рис. 18 Графік функції висоти газорідного шару тарілки провального типу від w м/с для колоні $0,057$ м.

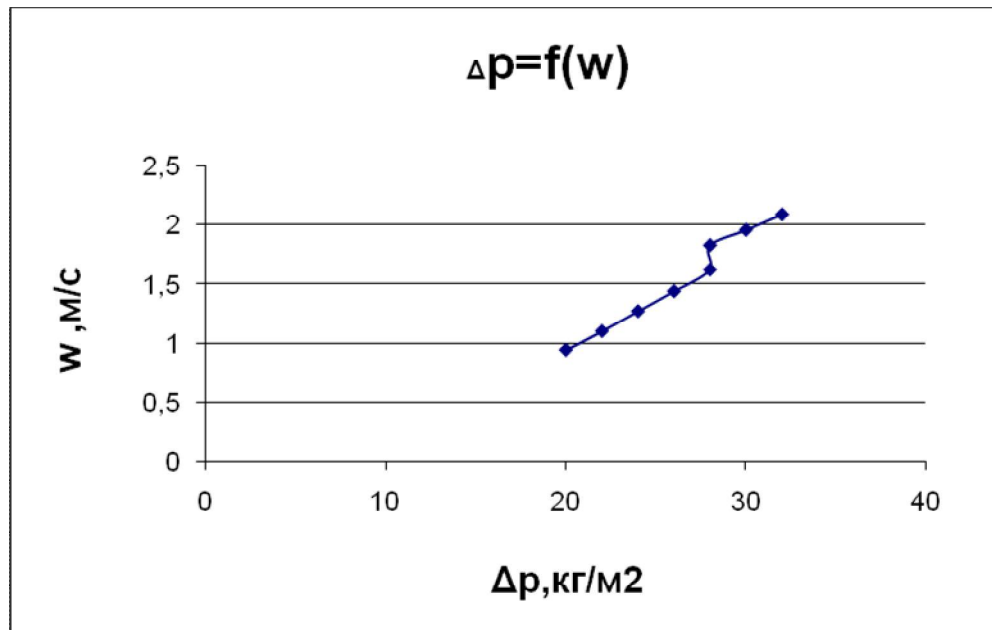


Рис.19 Графік функції гідравлічного опору тарілки провального типу від w м/с для колони 0,057 м.

Висновки

Висновки: проведено гідродинамічне моделювання тарілок провального типу. При гідродинамічному моделюванні були використанні дослідні данні одержані на колонні діаметром 57 мм. на модельній системі вода-повітря.

1. За допомогою рівняння (1) можна здійснювати гідродинамічне моделювання роботи тарілок провального типу, використовуючи параметр T , який представляє відношення суми периметрів усіх отворів плато тарілки до її діаметру.

2. Показаний приклад розрахунку швидкості газу в точці біфуркації тарілок провального типу з діаметром $D = 3,8$ м, з використанням даних отриманих при дослідженні тарілок провального типу в колоні з діаметром $D = 0,057$ м.

3. Показано, що в точці біфуркації при швидкості газу $w = 0,3$ м/с в колоні діаметром $D = 3,8$ м при щільності зрошення $L = 91,71$ м³/(м² год) вільне переріз тарілок має становити $f = 0,16$. При цьому $F_{\text{фактор}}$ складає $F_{\text{фактор}} = w \cdot \sqrt{\rho} = 0,3 \cdot \sqrt{11,94} = 1,03$ м/с

Для моделювання швидкості в точці біфуркації необхідно в колоні діаметром $D = 0,057$ м встановити тарілки провального типу з вільним перерізом $f = 0,35$, при цьому швидкість розрахована на повний переріз колони складе $w = 0,3$ м/с, і щільність зрошення буде $L = 91,71$ м³/(м² год).

4. Проведені в роботі дослідження підтвердили розрахункові дані. При щільності зрошення $L = 90$ м³/(м² год), в колоні діаметром $D = 0,057$ м, швидкість повітря в точці біфуркації склала $w = 1,1$ м/с, що майже відповідає $F_{\text{фактор}} = w \cdot \sqrt{\rho} = 0,3 \cdot \sqrt{11,94} = 1,03$ при $L = 91,71$ м³/(м² год) в колоні $D = 3,8$ м, з вільним перерізом тарілки $f = 0,16$, хоча вільний переріз тарілки в колоні $D = 0,057$ м. становив $f = 0,35$.

5. Таким чином, за допомогою рівняння (1), можна здійснювати гідродинамічний моделювання газорідного шару на тарілках провального типу великого діаметру ($D = 3,8$ м), використовуючи експериментальні дані отримані на колоні діаметром модельного розміру ($D = 0057$ м.)

ЛІТЕРАТУРА

1. Зайцев И.Д. Производство соды / Зайцев И.Д Ткач Г.А., Строев Н.Д.; М.: Химия, 1986. 312 с.
2. Стабников В. Н. Провальные тарелки ректификационных аппаратов и их применение на предприятиях спиртовой промышленности : обзор / Стабников В. Н., Штромило М. И. – М. : ЦНИИТЭИ-пищепром, 1971. - 20 с.
3. Стабников В. Н. Применение решетчатых провальных тарелок в процессе перегонки ацетоно-бутиловых бражек / Стабников В.Н., Штромило М. И., Н. Г. Бойченко [и др.] // Пищевая промышленность. - 1972. - Вып. 6. - 38-39. - (Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР).
4. Опыт внедрения на предприятиях ацетоно- бутиловой и спиртовой промышленности ректификационных колонн с решетчатыми провальными тарелками / Стабников В. Н., Штромило М. И., Сергеев А. Д., Беспалько А. П., Бойченко Н. Г. // III Всесоюзная конференция по теории и практике ректификации. - Северодонецк, 1973.- Ч. II. - С. 99 – 100.
5. Интенсификация процесса перегонки в аппаратах с решетчатыми провальными тарелками / Стабников В. Н., Штромило М. И., Сергеев А. Д. // V Всесоюзная конференция по теории и практикеректификации. - Северодонецк, 1984. - Ч. II. - С. 49 - 50.
6. Опыт использования тарельчатого абсорбера для улавливания бензольных углеводородов из коксового газа / Кузнецов В. Я., Шебастюк И. М., Большакова Л. Н., Конкина И. Н. – Кокс и Химия. -2005. - № 2. - С. 22-23.
7. Стабников В.Н. «Расчет и конструирование контактных устройств ректификационных и абсорбционных колонн» «Техника», 1970, 208 стр.

8. Зайцев И.Д. Производство соды / Зайцев И.Д Ткач Г.А., Строев Н.Д.; М.: Химия, 1986. 312 с.
9. Тарат Э. Я. О гидравлическом сопротивлении «провальных» решеток при пенном режиме / Тарат Э. Я., Вальберг А. Ю. –Журнал прикладной химии. - 1970. - Т. 43, №8. - С. 1706 – 1711.
10. Вальберг А. Ю. К вопросу о предельных параметрах пенного режима в аппаратах с полным протеканием жидкости через отверстия решеток / Вальберг А. Ю., Тарат Э. Я. – Журнал прикладной химии. - 1970. - Т. 43, №8. - С. 1712 – 1715.
11. Пенный режим и пенные аппараты / Тарат Э. Я, Мухленов И.П., Туболкин А. Ф. [и др.] ; под ред. И. П. Мухленова, Э. Я. Тарата. -Л. : Химия, 1977. – 303 с.
12. Ткач Г. А. Моделирование десорбционных процессов содового производства / Ткач Г. А., Смоляк В. Д. - Л. : Химия, 1973.
13. Рамм В. М. Абсорбция газов / Рамм В. М. - Изд. 2-е. - М. :Химия, 1976. - 655 с.
14. Лоскутов А. Ю. Введение в синергетику: учеб. рук. / Лоскутов А. Ю., Михайлов А .С. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.272 с.
15. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы : учеб. для машиностроит. вузов/ Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов [и др.]-2-е изд., перераб. - М.: Машиностроение, 1982. – 423 с. : ил.
16. Зелинский Ю.Г. Кафаров В.В., «Химическая промышленность», 1961, №2.
17. Касаткина А. Г., Дытнерский Ю. И. и др., «Химическая промышленность», 1958, № 3.

18. Касаткин А.Г., Дытнерский Ю. И. и др., Труды МХТИ им. Д. И. Менделеева, вып. XXXIII, 1961.
19. Тараненко Г. В. Гидравлические и массообменные характеристики тарелок провального типа с различным диаметром отверстий: монография. - Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2013. – 174 с.
20. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты, «Химия», М.— Л., 1965.
21. Касаткин А. Г. К расчету колонн с провальными тарелками// Касаткин А. Г., Дытнерский Ю. И., Умаров С. У. – Химическая промышленность. - №3. – 1958. - С. 38 – 45.
22. Взаимодействие газов с жидкостями в пенном режиме / [И.П. Мухленов, Г.А. Ткач, И. Д. Зайцев и др.];– Химическая промышленность. 1983. № 3 С. 38-41.
23. Рузинов Л. П. Статистические методы оптимизации химических процессов – М. Химия, 1972, 200 с.
24. Масштабный переход в химической технологии: разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования / Розен А. М., Мартюшин Е. И., Олевский В. М. [и др.] ; под ред. А. М. Розена. - М. : Химия, 1980. - 320 с. : ил.
25. Kato Y. e. a. — Chem. Eng. Japan, 1972, v. 5, № 2, p. 112—118.
26. Goto /., Okomoto T., Terakata T. Preprint of the 34th Annual Meeting of the Soc. Chem. Eng., Japan, № C101, 1969.
27. Aogama Y. e. a. – Chem. Eng. Japan, 1968, v.1, №2, p.158–163.
28. Mashelkar R. A. – Brit. Chem. Eng., 1970, v. 15, № 10, p. 1297–1304.

29. Chia-San Shyu, Miyachi T. – Kagaky-Kogaky, 1971, v.35, №6, p.663–668.
30. Kato Y., Nishiwaki A – Kagaky-Kogaky, 1971, v.35, №8, p.912–915.
31. Taranenko, G. V. Calculation of the lower operating limit of dual-flow plates with different geometrical characteristics [Text] /G. V. Taranenko // ScienceRise. – 2015. – Vol. 3, Issue 2 (8). – P. 67–73. doi: 10.15587/2313-8416.2015.39196