

Вступ .....	6
1. Опис тарілки провального типу.....	7
2. Застосування тарілок провального типу .....	11
3. Принцип роботи провальних тарілок .....	13
3.1 Режими роботи тарілок провального типу.....	13
3.2 Результати досліджень меж роботи тарілок провального типу.....	17
4. Розрахунок режимів роботи тарілок.....	23
5. Теорія масштабного переходу .....	30
6. Опис експериментальної установки для гідравлічних і кінетичних досліджень тарілок провального типу з колоною $D = 0,057$ м. ....	32
6.1 Опис експериментальної установки з колоною $D = 0,057$ м:.....	32
6.2 Схема лабораторної установки.....	33
6.3 Експериментальне дослідження.....	33
6.4 Пуск колони.....	34
6.5 Зупинка колони.....	34
7. Експериментальні дані .....	35
8. Розрахунок основних параметрів роботи колони.....	37
8.1 Матеріальний баланс колони.....	40
8.2 Визначення середніх значень параметрів по колоні, фізико-хімічних і термодинамічних констант фаз .....	41
8.3 Визначення основних геометричних параметрів колони.....	47
9. Матеріал колони .....	48
10. Розрахунок вільного перерізу тарілки провального типу $D = 0,8$ м .....	50
11. Розрахунок вільного перерізу тарілки провального типу $D = 0.057$ м .....	59
12. Техніка безпеки при роботі в лабораторії .....	68
Висновки .....	71
Література .....	73
Додатки	

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- $g$  – прискорення сили тяжіння,  $\text{м/сек}^2$
- $F_c$  – живе перетин,  $\text{м}^2/\text{м}^2$
- $a$  – ширина щілини,  $\text{м}$
- $\mu_{ж}$  – в'язкість рідини,  $\text{спз}$
- $D$  – діаметр колони,  $\text{м}$
- $\omega$  – швидкість пара для повного перерізу колони в точці Е,  $\text{м/сек}^2$
- $\gamma_g$  і  $\gamma_p$  – питомі ваги газу (пара) і рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;
- $g$  – прискорення сили тяжіння,  $\text{м/с}^2$ ;
- $d_e$  – еквівалентний діаметр щілини (отвору в тарілці),  $\text{м}$ ;
- $F_c$  – вільний переріз тарілки,  $\text{м}^2/\text{м}^2$ ;
- $\mu_p$  – густина рідини,  $\text{сп}$ ;
- $\mu_v$  – густина води при  $20^\circ$ ,  $\text{сп}$ .
- $G_f$  – кількість флегми,  $\text{кг/год}$ ;
- $G_f$  – кількість вихідної суміши,  $\text{кг/год}$ ;
- $G_n$  – кількість рідини, що проходить крізь низ колони,  $\text{кг/год}$ ;
- $\rho_{рід}$  і  $\rho_n$  – питомі ваги газу (пара) і рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;
- $g$  – прискорення сили тяжіння,  $\text{м/с}^2$ ;
- $d_0$  – діаметр отворів в тарілці,  $\text{м}$ ;
- $f$  – вільний переріз тарілки,  $\text{м}^2/\text{м}^2$ ;
- $\mu_{рід}$  – в'язкість рідини,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;
- $\mu_v$  – в'язкість води при  $20^\circ$ ,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;
- $V$  – витрата пари,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;
- $L$  – щільність зрошення,  $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{год})$ ;
- $S$  – площа колони,  $\text{м}^2$
- $D$  – внутрішній діаметр колони,  $\text{м}$ ;
- $S_0$  – площа отвору,  $\text{м}^2$ ;
- $N$  – кількість отворів, шт;

## Вступ

В хімічній, нафто-хімічній та харчовій промисловостях широко застосовуються дірчасті тарілки провального типу. [1 – 6]

Тарілки такого типу зручні в експлуатації, прості за конструкцією, легкі у виготовленні, мають низьку металоємність, що дає можливість зменшити витрати на їх виготовлення.

Дірчасті тарілки доцільно застосовувати на виробництвах з забрудненими середовищами. Обумовлено це тим, що в апаратах можна застосовувати крупно-дірчасті тарілки з діаметром отворів до 120 мм, які дозволяють усунути проблему з можливим забрудненням отворів при роботі.

До недоліків дірчастих тарілок відносять вузький діапазон їх роботи, однак цей недолікується шляхом точної методики розрахунку.

Рішенням цієї задачі 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.

## 1.Опис тарілки провального типу

У колонах з провальними тарілками переливні труби відсутні, внаслідок цього газ з рідиною проходять крізь ті самі отвори (рис. 2.21). На тарілці одночасно з взаємодією рідини та газу барботажом відбувається стікання частини рідини на нижчерозміщену тарілку – так би мовити «провалювання» рідини. Тому тарілки такого типу зазвичай називають провальними. До них належать дірчасті, решітчасті, трубчасті і хвилясті тарілки.



Рис. 2.21. Тарічаста колона без зливних механізмів: 1 – колона; 2 – тарілки; 3 – розподільвач рідини

Гідродинамічні режими роботи провальних тарілок (рис. 2.22) можна встановити на основі залежності їхнього гідравлічного опору від швидкості газу за постійної густини зрошення.

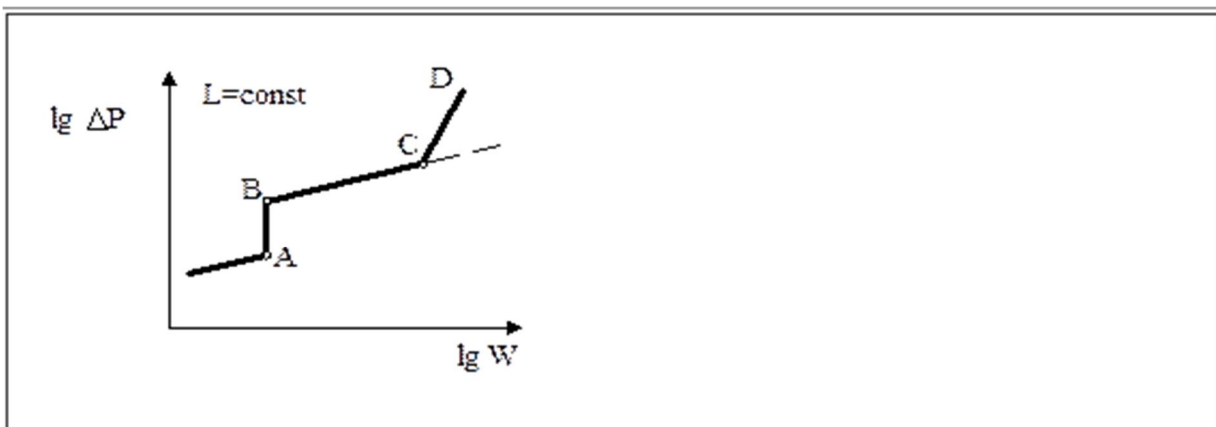


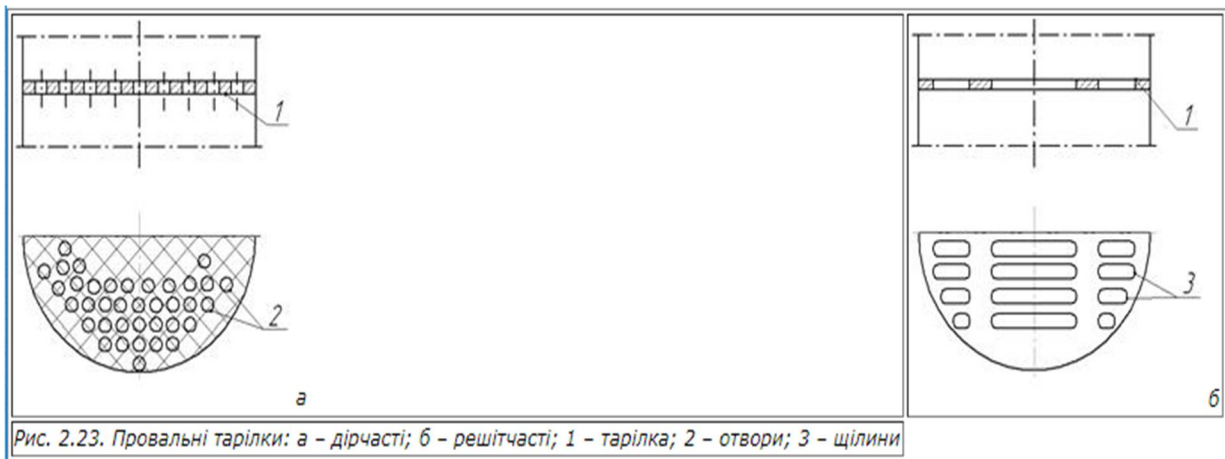
Рис. 2.22. Залежність гідравлічного опору провальної тарілки від швидкості газу в колоні

За малих величин швидкості руху газу рідина на тарілці не затримується, це можна побачити на відрізку АВ, тому що сила тертя між фазами є незначною. Зі збільшенням швидкості газу рідина починає накопичуватися на тарілці, як це видно на відрізку ВС, і газ барботує крізь рідину. В інтервалі швидкостей газу, які відповідають відрізку ВС, тарілка працює в нормальному режимі. При цьому газ і рідина поперемінно проходять крізь ті й самі отвори. Якщо швидкість газу зростає ще більше, то внаслідок

збільшення тертя між газом і рідиною різко збільшується нагромадження рідини на тарілці і, як наслідок, – її гідравлічний опір, що сприяє виникненню стану захливання, це можна побачити на відрізку CD. За невеликих витрат рідини, великого вільного перетину тарілки та діаметра отворів або щілин перелом у точці 3 не відбувається.

Варто зазначити, що перехід від одного режиму до іншого відбувається поступово. Загальних методів розрахунку границь гідродинамічних режимів - критичних точок для барботажних тарілок не існує. Тому під час проектування тарілчастих апаратів в результаті розрахунку визначають швидкість газу, яка відповідає нижній та верхній межах роботи тарілки та потім вибирають робочу швидкість газу.

Дірчасті провальні тарілки (рис. 2.23а) за будовою дуже схожі на сітчасті тарілки і відрізняються від них відсутністю переливних труб.



Дірчасті та решітчасті провальні тарілки відрізняються простотою конструкції, низькою вартістю монтажу і виготовлення, а також порівняно невеликим гідравлічним опором.

Перевагами трубчастих провальних тарілок є легкість відведення тепла від барботажного шару на тарілці внаслідок пропускання охолоджувального агента по трубах, із яких складається тарілка. Однак ці тарілки порівняно з дірчастими і решітчастими тарілками - значно складніші за монтажем і будовою.

Основний недолік колон з дірчастими, решітчастими та трубчастими тарілками провального типу – невеликий інтервал зміни швидкостей газу і рідини, в межах якого підтримується стійка та ефективна робота тарілок.

У більш ширшому діапазоні навантажень працюють хвилясті провальні тарілки. Однак ці тарілки більш складні, ніж дірчасті та решітчасті провальні тарілки за монтажем та будовою.

Через те, що у провальних тарілок відсутні переливи – ці тарілки є простішими за тарілок інших типів.

Відмінною особливістю цих тарілок є схема протитоку, завдяки якій

проходить інтенсивне перемішування рідини по всій висоті контактної зони. Газ (пара) та рідина проходять протиточно через одні і ті ж самі отвори або щілини, при цьому місця, де рідина стікає і проходить пар, хаотично переміщуються по всій площі тарілки, в результаті чого на тарільці утворюється дисперсна система, на характер якої впливає ряд факторів: лінійна швидкість газу або пари, геометричні розміри тарілок, а також фізичні властивості фаз.

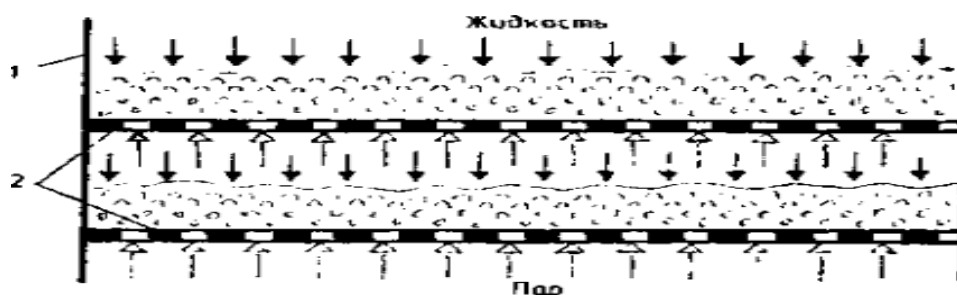


Рис. 2 Схема роботи тарілки провального типу

Колони, що обладнані тарілками без переливних пристроїв, які володіють рядом переваг у порівнянні із колонами, в яких установлені тарілки інших типів: більш високою продуктивністю, стійкішою роботою при випадках зміни навантажень в широких межах, більш високою ефективністю поділу, відносно низькою вартістю монтажу та виготовлення, меншими витратами на експлуатацію.

Тарілка являє собою плоский лист товщиною 2,5—6 мм, який складається з окремих секцій, які укріплені на опорному кільці та балках каркасу, що перекриває всю колону у перерізі. Дірки тарілок виконуються штампуванням або фрезеруються, площа яких становить від 10 до 30% площі всієї тарілки. Відстань між тарілками приймається від 300 до 600 мм. Тарілки, у яких діаметр до 800 мм - виготовляються з цільного листа. Тарілки з великим діаметром виготовляються з секцій, ширина яких приймається такою, щоб монтаж тарілок здійснювався крізь люк.

На тарілках не має спеціальних переливних пристроїв, рідина перетікає з

тарілки на тарілку через ті ж самі отвори, крізь які проходить газ або пар. При нормальній роботі тарілок місця проходу рідини та барботажу газу або пари розташовуються рівномірно за всім перерізом тарілок. Стійка робота тарілок, чутливість до коливань від навантаження, а також забруднення і опади, які швидко забивають отвори тарілок, відповідають таким навантаженням пари та рідини, при яких здійснюється найбільший інтенсивний контакт та висока ефективність поділу.

## 2. Застосування тарілок провального типу

Тарілки провального типу застосовуються в різних виробництвах, наприклад у виробництвах соди, мокрої очистки газів від пилу, а також у коксовій промисловості. Вони є простими у виготовленні та надійними в експлуатації. Гратчасті тарілки з невеликими діаметрами щілин мають деякі недоліки. До цих недоліків можна віднести можливість забивання щілин, недостатньо стійка робота поза оптимальних режимів.

Дірчасті тарілки з переливом працюють в порівняно широкому діапазоні навантажень, що дозволяє проводити процес ректифікації, починаючи з 50 - 60% від номінального навантаження.

Дірчасті тарілки рекомендовані до застосування з ромбічною розміткою центрів отворів, такої же, як у апаратах з переливами. Дірчасті тарілки є аналогічними за влаштуванням сітчастих тарілок і відрізняються від них лише відсутністю зливних пристроїв.

Випробувані дірчасті тарілки з живим перетином 7,6 – 22,5% (діаметр отворів 3,5 – 5,3 мм) і трубчасті тарілки. Трубчасті тарілки виявилися менш ефективними.

Дуже перспективними, а також цікавими є так звані гратчасті та дірчасті тарілки. Ці тарілки відрізняються від ковпачкових, сітчатих або пінних тарілок відсутністю переливних пристроїв.

Певну роль відіграє також і вільний перетин тарілки, її товщина, форма і порядок розміщення отворів на тарілці - у деяких умовах решітки щілинного типу пропускають менше рідини, ніж дірчасті тарілки.

Дірчаста тарілка з протитоком. При застосуванні отворів великого діаметру якісно змінюється робота дірчастих протиточних елементів у порівнянні з роботою звичайних одноковпачкових тарілок. Також можна зазначити, що дірчасті тарілки за своїми показниками відрізняються від прийнятих в промисловості сітчатих тарілок (діаметр отворів яких складає від 1 до 20 мм) і від протиточних гратчастих тарілок.

Значний обсяг рідини, який затримується барботажними тарілками, що призводить до необхідності збільшення маси колони виходячи з умов міцності,



а також призводить до будівництва потужних фундаментів та ускладнює процес управління колонами і проведення підготовчих операцій перед чищенням і ремонтом. Для виключення забивання щілин застосовують крупнодірчаті тарілки.

### 3. Принцип роботи провальних тарілок

#### 3.1 Режими роботи тарілок провального типу

Однією з важливих характеристик роботи тарілок провального типу є діапазон їх стійкої роботи. Ця характеристика пов'язана з режимами роботи тарілок провального типу, які виникають при збільшенні швидкості газу (пари) в перерізі колони при одній і тій же самій щільності зрошення.

У роботі [2] ці режими відображені на графіку залежності гідравлічного опору тарілок провального типу від швидкості газу (пари) у перерізі колони (рис. 18) і визначені наступним чином:

- режим змоченою тарілки (I) існує, якщо швидкість пари (газу) мала. Контакт пари і рідини відбувається на поверхні через стікаючі з тарілок краплі і струмені рідини, які піднімаються. Цей режим не є робочим;

- барботажний режим (II) спостерігається, коли швидкість збільшується. На тарільці існує шар світлої рідини, через який барботує пар і шар піни. При подальшому збільшенні швидкості пари висота шару світлої рідини зменшується, а висота шару піни збільшується;

- режим емульгування або аерації (III), яких характеризується тим, що шар світлої рідини майже повністю зникає. На тарільці 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 тарільці приходять в хвилеподібний рух;

«Захлинання» настає при збільшенні швидкості пари, коли рідина та піна не стікають з тарілки, а викидаються на вищележачу тарілку.

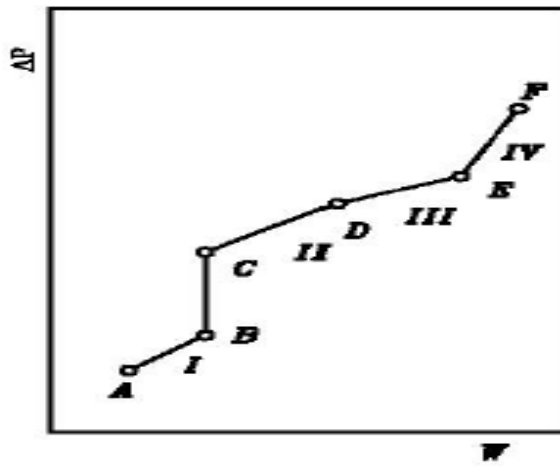


Рис.3. Графік залежності опору тарілок провального типу від швидкості пари:

I – IV – гідродинамічні режими роботи.

Точки В, С, D, Е уявляють собою моменти переходу від одного режиму до іншого. Точка Е визначає максимально допустиму швидкість пара в колоні.

У роботі [9] наведено графік (рис. 4) залежності швидкості газу в перерізі колони від гідравлічного опору тарілок провального типу. На графіках критичними точками А і В характеризуються гідродинамічні режими роботи тарілок провального типу.

В роботі зазначається, що при невеликих швидкостях газу до момента, відповідного точці А ( $L=\text{const}$ ), рідина на тарілці не затримується. При збільшенні швидкості газу (точка А і вище) відбувається поступове накопичення рідини та видно шар, через який барботують бульбашки газу. Якщо і далі збільшувати швидкість газу (від точки А до точки В) - шар рідини на тарілці провального типу буде зменшуватися і буде зростати величина спіненого шару. При збільшенні швидкості вище точки В настає режим захлинання колони. Автори роботи відзначають, що іноді (зазвичай на тарілках, у яких великий вільний перетин) перелом прямої в точці В не виявляється. Однак, при швидкостях вище цієї точки можемо спостерігати утворення нового гідродинамічного режиму, який називають струминним або ежекційним. Характеризується цей режим роботи тим, що

газові струмені пробивають шар рідини на тарільці, не розсіюючись в ній, а раніше утворена піна руйнується і рідина знаходиться у стані великих бризок і струменів.

Необхідність визначення меж швидкості газу у перерізі колони, при яких на тарільці провального типу буде існувати пінний режим, вказується у роботі [10]. Можна зазначити, що отримана раніше залежність для визначення початку хвильового режиму на гратчастих тарілках виявилася неприйнятною, тому що вона була отримана в апаратах малого діаметра (0,057 і 0,114 м), і тому перебуває під сильним впливом діаметра апарату, із збільшенням якого дуже значно зростає гранично допустима швидкість газу для пінного режиму  $w_{кр}$ .

У роботі проведено аналіз механізму переходу від пінного режиму до хвильового режиму наступним чином. При певній швидкості газу  $w_r$  і постійної щільності зрошення починається перехідний між пінним і хвильовим режимами, при якому збільшення ІН з зростанням  $w_r$  практично дорівнює нулю. Можна відзначити, що при пінному режимі зі збільшенням  $w_r$ , частка вільного перетину тарілки  $(1 - \tau)$ , яка зайнята газом, зростає. При незмінній кількості рідини, яка підводиться до тарілки, і зниженню частки отворів  $\tau$ , через які проходить масообмін, природно повинна збільшуватися швидкість витікання рідини  $w_p$ . В іншому випадку повинен був би інтенсивно наростати шар піни на тарільці, що в цей період не спостерігається (перехід від пінного режиму до хвильового режиму). Збільшення ж  $w_p$  можливо тільки з ростом гребенів хвиль на поверхні шару піни, висота яких  $\Delta h$  викликає витікання рідини. Із збільшенням  $\Delta h$  відбувається зменшення слою рідини, який затримується на тарільці  $h_0$ . За певного моменту збільшення  $\Delta h$  досягає таких розмірів, що починається розгойдування рідини на тарільці, та стає вже очевидним хвильовий режим. Величина  $h_0$  досягає при цьому мінімальних значень, тому стають можливими струменеві прориви газу, збільшується бризкоуніс, а також стає можливим і зменшення ефективності пиловловлення. Про нестійкий

характер перехідного режиму кажуть наступні спостереження при експериментах. При  $w_T > 2,0$  м/с зі зростанням швидкості газу іноді спостерігалось збільшення ІН, що супроводжується закономірним підняттям шару піни на тарільці, як раптом несподівано без будь-яких змін  $w_T$  і щільності зрошення шар піни знижувався. Значення ІН падало, при цьому виникав яскраво виражений хвильовий режим (рідина починала підкидуватись над тарілкою, а в окремих ділянках тарілка навіть практично оголювалася). Подібна ж картина спостерігалася також у зворотному порядку, коли знижували  $w_T$  при хвильовому режимі. Легко побачити, що причина цих явищ у накладанні коливань, що мають місце в шарі піни. Якщо продовжити розглядати гідродинамічний процес на тарільці зі зростанням  $w_T$ , то, очевидно, що в подальшому зменшення  $\tau$  вже не зможе компенсуватися збільшенням  $w_p$ , починається різке збільшення шару рідини на тарільці, що в кінці кінців призводить до режиму захлинання.

Автори роботи [11], при розгляді режиму роботи тарілок провального типу, вказують на відмінність роботи тарілок провального типу з невеликим і великим вільними перетинами ( $f \geq 30\%$ ). Вони зазначають, що на тарілках із великим вільним перетином не можна простежити зміну гідродинамічних режимів зі зростанням швидкості газу. Практично аж до точки захлинання на них утворюється невисокий газорідинної шар з тонкими постійно розриваючимися плівками рідини.

Характерним для роботи подібних тарілок є інтенсивний бризкоуніс, особливо при високих швидкостях газу в перерізі колони ( $w > 1-2$  м/с), тому що практично немає сепаруючого шару газорідинної піни.

В роботі [12] автори також відзначають відмінність роботи тарілок провального типу різного вільного перерізу. Вони зазначають, що на тарілках з великим вільним перетином та значним еквівалентним діаметром отворів ( $f \geq 30\%$  і  $d_e \geq 0,012$  м для дірчастих або  $d_e \geq 0,006$  м для ґратчастих тарілок) у всьому діапазоні швидкостей газу існував тільки

режим з погано структурованою піною. На тарілках з малим вільним перетином і невеликим еквівалентним діаметром отворів ( $f < 15\%$ ,  $d_e < 0,006$  м) можна спостерігати тільки перехідний режим.

В монографії [13] було проведено огляд робіт по визначенню режимів роботи тарілок провального типу. Зазначається, що різні дослідники по-різному оцінюють візуальну картину, що спостерігається за тих чи інших режимах на тарілках провального типу, та називають по-різному ці режими. Перехід від одного режиму до іншого визначається гідродинамічними факторами, такими як швидкість газу та рідини, а також властивостями фаз і геометрії тарілки.

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

### 3.2 Результати досліджень меж роботи тарілок провального типу

Визначення меж роботи залежності мінімальної ( $w_{min}$ ) та максимальної ( $w_{max}$ ) швидкостей газу у перерізі колони від щільності зрошення  $L$  для тарілок, у яких малий вільний перетин, встановлених у колони різного діаметра, проводилося на стендах гідравлічних випробувань у відповідності з таблицею 1.

Таблиця 1: Геометричні параметри досліджених тарілок провального типу

№ тарілки	Діаметр колони $D$ , м	Вільний перетин	Діаметр отворів $d_0$ , м
1	0,5	16	0,012
2		25	
3		36	
4		16	

5	0,4	36	
6		56	
7	0,3	16	0,008
8		36	0,012
9		56	
10	0,15	16	0,008
11		16	0,012
12		19	
13		22	
14		25	
15		30	
16		36	
17		46	0,07

За швидкість  $w_{min}$  брали швидкість газу при  $L=const$ , при якій на тарілці провального типу з'являвся стійкий барботажний шар. При швидкості  $w_{max}$  газорідинної шар на тарільці починав руйнуватися. В колонах діаметром  $D = 0,057$  і  $0,15$  м газорідинної шар при швидкості, що перевищує  $w_{max}$ , починав різко зростати до виходу через верх колони. В колоні  $D = 2$  м, при збільшенні швидкості газу вище  $w_{max}$ , через частину рідини на тарілці газ взагалі не барботував, а через іншу частину тарілки газ проходив з великою швидкістю. Межу розділу газової та газорідинної фаз при  $w_{max}$  на провальних тарілках з малим вільним перетином було досить добре видно.

В ході випробувань було встановлено те, що діапазон стійкої роботи ( $w_{min} - w_{max}$ ) для тарілок провального типу встановлених у колоні з  $D = 0,057$  м суттєво (приблизно в 2 рази) менше, ніж діапазон стійкої роботи тарілки встановленої в колоні  $D = 2$  м, за великої щільності зрошення. Значення вільних перерізів тарілок і діаметрів отворів плато тарілки були близькі до колон різного діаметра.

На рис. 5 і 7 представлена структура барботажного шару характерна для висоти барботажного шару до  $H \approx 0,1$  м.

Як видно з рисунків, барбота́жний шар характеризується однорідною по всім напрямкам комірчастою структурою піни, горизонтальною поверхнею барбота́жного шару, висота якої не змінюється на протязі часу для одних і тих же швидкостей газової та рідкої фаз. Це говорить про те, що в барбота́жному шарі сили тяжіння перебільшують сили інерції рідини. Можна вважати, що в цьому режимі барбота́жний шар, як самоорганізована система, що знаходиться у рівновазі, тому що сили гідростатичного тиску та масові сили постійні у часі у будь-якій точці барбота́жного шару. Вектор швидкості руху рідини має один напрямок – зверху вниз. Так як газорідинний шар не піддається дії зовнішніх сил, а тільки силам, у результаті яких він утворений, то така система називається самоорганізована.

Крім того, барбота́жний шар практично симетричний відносно осей координат, у яких початок розташовується на центральній вертикальній вісі дірчастої тарілки.

При досягненні висоти газорідинного шару більшою, ніж  $H \approx 0,1$  м він починає втрачати стійкість (рис. 6, 8). Утворюється газорідинний рухливий шар, який характеризується відсутністю структурованої комірчастої піни. Вільна поверхня газорідинного шару є криволінійною. Її висота змінюється у часі для одних і тих же швидкостей газової і рідкої фаз, а таке має амплітуду і частоту. У газорідинному шарі спостерігаються флуктуації таких параметрів, як гідравлічний опір і висота газорідинного шару, а також швидкостей руху рідини, всі вони мають хаотичний напрямок. Це означає, що сили інерції рідини в такому газорідинному шарі перевищують сили тяжіння.

Окрім того, газорідинний шар втрачає симетричність відносно осей координат, початок яких розташовується на центральній вертикальній осі дірчастої тарілки.

Таким чином, газорідинний шар, як самоорганізована система, втрачає стійкість і стає динамічною невривноваженою системою. Перехід від



стійкої рівноважної ізольованої системи самоорганізується до нерівноважної системи та цей процес називається біфуркація [14].

Дослідження тарілок повального типу з великим вільним перетином показали, що в колонах невеликого діаметра ( $D = 0,057, 0,15$  м), ще з'являвся барботажний шар при  $w_{min}$ . У колоні  $D = 0,4$  м і, особливо, в колоні  $D = 2$  м, при  $w_{min}$  можна було побачити газорідинний шар, який складався з крапель і плівок рідини з високим газовмістом. Таким чином, в газорідинному шарі знаходила місце інверсія фаз, коли газ був суцільною фазою, а рідина була дисперсною фазою.

Верхню межу роботи дірчастих тарілок з великим вільним перетином ( $w_{max}$ ) в колонах невеликого діаметра ( $D = 0,057, 0,15$  м) визначали за висотою вільної поверхні газорідинного шару, так само, як і для тарілок з малим вільним перетином. У колонах діаметром  $D = 0,4$  м і  $D = 2$  м не було вільної поверхні газорідинного шару. Тому досить умовно визначали  $w_{max}$  за висотою підкидання найбільших великих крапель і плівок рідини.

Якщо в колонах невеликого діаметра ( $D = 0,057, 0,15$  м) існував перехід від однорідного барботажного до рухомого газорідинного шару, при висоті цього шару  $H \approx 0,1$  м, то в колонах діаметром  $D = 0,4$  м і  $D = 2$  м такого переходу не спостерігалось.

Виходячи з вище описаного, у залежності від мінімальної ( $w_{min}$ ) та максимальної ( $w_{max}$ ) швидкостей, від швидкостей газової та рідкої фаз тарілок провального типу з великим вільним перетином можна сказати, що діапазон їх стійкої роботи ( $w_{min} - w_{max}$ ) практично такий же, як і у тарілок провального типу з малим вільним перетином, установлених у колонах великого діаметру ( $D = 2$  м). Однак його значення зрушені у бік великих швидкостей газу в перерізі колони при однаковій щільності зрошення рідини. Діапазон стійкої роботи ( $w_{min} - w_{max}$ ) у дірчастих тарілках з великим вільним перетином від діаметра колони залежить менше, ніж у дірчастих тарілках з малим вільним перетином.

У всіх представлених дірчастих тарілках діаметр отворів плато тарілки становив  $d_0 = 0,012$  м (крім тарілки № 10, таблиця 10, де  $d_0 = 0,008$  м).

Після аналізу поданих експериментальних даних робимо висновок, що нижня та верхня межі роботи ( $w_{min}$  і  $w_{max}$ ) дірчастих тарілок з однаковим діаметром отворів, істотно залежать від вільного перетину цих тарілок для одних і тих же співвідношень навантажень по газовій і рідкій фазах. В той час, як нижня межа роботи ( $w_{min}$ ) дірчастих тарілок, майже не залежить від діаметра колони для різних вільних перерізів тарілок,  $w_{max}$  істотно залежить від діаметра колони, особливо для тарілок провального типу з малим вільним перетином тарілок для одних і тих же співвідношень навантажень по газовій і рідкій фазах.

Діапазон стійкої роботи дірчастих тарілок пов'язаний з режимами їх роботи. Автори [2, 9] розрізняють робочі та не робочі режими роботи дірчастих тарілок. Наприклад, режим змоченої тарілки [2] і хвильовий режим [9] не є робочими режимами тарілок. У цій же роботі [9] рекомендується для роботи тарілок провального типу в процесах пиловловлення лише пінний режим роботи тарілок.

У колоні діаметром  $D = 0,15$  м, здійснюємо якісну зміну структури однорідного барботажного шару в точці біфуркації і він стає рухомим газорідним шаром.

У відповідності з цим, на тарілках провального типу можна виділити три режими роботи тарілок:

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

Перехід від режиму однорідного барботажного шару до режиму

рухомого газорідного шару в колоні  $D = 0,15$  м проходить стрибкоподібно, тобто за незначної зміни керуючого параметра - швидкості газу в перерізі колони, бачимо стрибкоподібну зміну обумовленого параметру (гідравлічного опору дірчастих тарілок).

Після вивчення меж роботи дірчастих тарілок можна зробити наступні висновки:

– діапазон стійкої роботи дірчастих тарілок залежить від їх геометричних характеристик, таких як вільний перетин тарілки, а також їх діаметра.

– у межах сталої роботи дірчастих тарілок від мінімальної швидкості ( $w_{min}$ ), при якій на тарільці з'являється стійкий барботаажний шар, до максимальної швидкості газу в перерізі колони ( $w_{max}$ ), при якій відбувається руйнування газорідного шару, існують три режими роботи дірчастих тарілок (режим однорідного барботаажного шару; режим рухомого газорідного шару і режим руйнування газорідного шару).

– перехід від режиму однорідного барботаажного шару до режиму рухомого газорідного шару відбувається в точці біфуркації, коли спостерігається принципова зміна структури барботаажного шару, і основні його параметри, такі як гідравлічний опір тарілки і висота газорідного шару, в даній точці набувають певну амплітуду та частоту.

– перехід від режиму однорідного барботаажного шару до режиму рухомого газорідного шару відбувається з висотою газорідного шару  $H \approx 0,1$  м для всіх досліджених тарілок (таблиця 1) і всіх співвідношень витрат газової і рідкої фаз у точці біфуркації.

#### 4. Розрахунок режимів роботи тарілок

Критична точка переходу до хвильового режиму від режиму емульгування (рис 3), тобто точку Е, за посібником Ю. Р. Зелінського [16] пропонується знаходити по рівнянню:

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

де  $\omega$  – швидкість пара в точці Е, м/сек<sup>2</sup> для повного перерізу колони

$g$  – прискорення сили тяжіння, м/сек<sup>2</sup>

$F$  – перетин, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>

$a$  – ширина щілини, м

$\gamma_r$  і  $\gamma_{ж}$  – питома вага відповідно газу і рідини, кг/м<sup>3</sup>

$\mu_{ж}$  – в'язкість рідини, спз

$D$  – діаметр колони, м

$L$  і  $G$  – навантаження по рідині і газу, кг/м<sup>2</sup>сек

Для того, щоб визначити максимальну допустиму швидкість і вибрати робочу швидкість в колоні, використовуємо це рівняння.

Аналогічна формула запропонована А. Р. Касаткіним та ін [17] для точок В-С (підвисання).

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

Останній метод базується на кореляції двох комплексних величин Х і У. До кожної з цих величин входять параметри, які визначають роботу провальної тарілки.

Для визначення залежності від різних чинників граничних швидкостей в колоні з тарілками провального типу, було побудовано

графік (рис. 10.), який є аналогічним раніше запропонованому для визначення граничних швидкостей у колонах з масообмінними насадками.

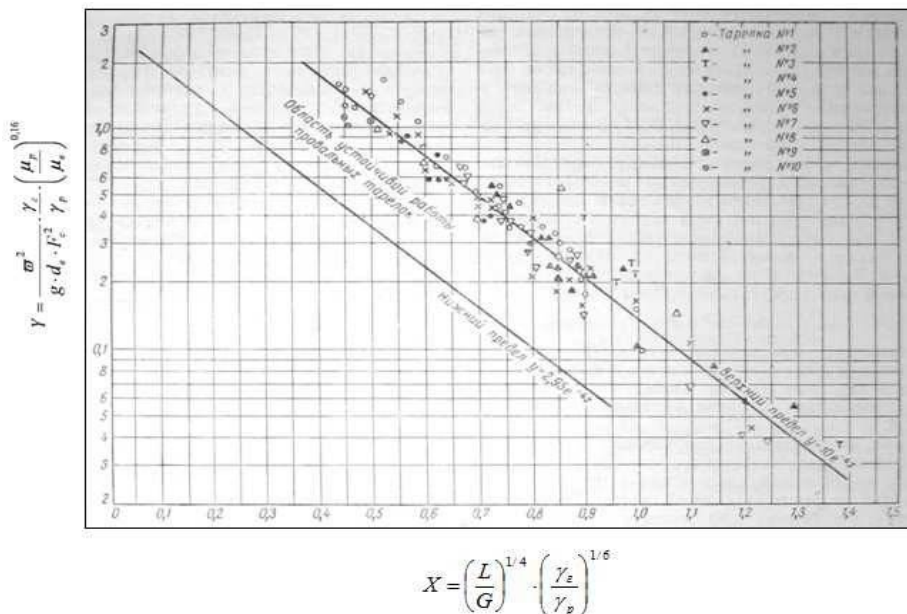


Рис. 10 Залежність відношення вагових швидкостей потоків від граничної швидкості газу (пара) (швидкості захлинання) у колонах з тарілками провального типу, їхні фізичні властивості і визначальні розміри тарілок ( $D_k = 0,075$  і  $0,240$  м,  $f = 0,13 - 0,4$ )

По осі абсцис нанесено комплекс

$$X = \left( \frac{G_p}{G_n} \right)^{1/4} \cdot \left( \frac{\rho_z}{\rho_p} \right)^{1/8} \quad (3)$$

а по осі ординат комплекс

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left( \frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16} \quad (4)$$

де:  $L$  і  $G$  – вагові швидкості рідини і газу (пара),  $\text{кг/м}^2 \cdot \text{год}$ ;  $\gamma_r$  і  $\gamma_p$  – питомі ваги газу (пара) і рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;

$g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;

$d_e$  – еквівалентний діаметр отвору в тарілці, м;

$F_c$  – вільний переріз тарілки, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>;

$\mu_p$  – густина рідини, сп;

$\mu_v$  – густина води при 20°, сп.

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

Відношення  $L/G$  у дослідах змінювалося від 2,5 до 148, а швидкість – газу від 0,20 до 3,78 м/с. Швидкість захлинання або гранична швидкість газу  $\omega$ , м/с, визначалася візуально по різкому зростанню висоти шару піни на тарільці і по різкому збільшенню опору тарілки.

Для перевірки отриманих результатів на графіку були показані також дослідні дані інших авторів. З графіка випливає те, що 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 можна укласти на одну пряму (у напівлогарифмічних координатах), яку можна описати рівнянням:

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

де:  $e$  – основа натуральних логарифмів.

Отже, за рівнянням (5) можна визначити граничну швидкість газу (пари), але робоча швидкість має бути вибрана декілька більш нижчою за розраховану за рівнянням (5), оскільки у виробничих умовах можливе збільшення швидкості вище граничної, що призводить до порушення режиму роботи апарату. Нижня межа роботи тарілок провального типу обумовлюється повним зливом рідини з тарілок. Значення цієї швидкості можна визначити за допомогою дослідних даних, які представлені нижньою похилою прямою

(рис. 10). Ця пряма має однаковий нахил із прямою верхньої межі роботи (захлинання) тарілок і відповідає рівнянню  $Y = 2,95 \cdot e^{-4x}$  (6)

У роботі [19] було проведено гідравлічні дослідження роботи тарілок провального типу в широкому діапазоні зміни вільного перерізу тарілок від  $f = 16$  до  $36$  % у колонах різного діаметру  $D = 0,057, 0,15, 0,4$  і  $0,5$  м. Діаметр отворів тарілок в колоні  $D = 0,057$  м складав  $d_0 = 0,005$  м. В решті колон –  $d_0 = 0,008$  м. Навантаження за рідиною змінювалися в межах  $L = 4 - 150$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>год, швидкість газу в перерізі колони досягала  $w = 4$  м/с. Було також проведено гідравлічні та кінетичні дослідження тарілок провального типу на стенді з колоною  $D = 0,3$  м при ректифікації системи нітратної кислоти – пентаоксид діазоту. 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 за різними співвідношеннями між газовою і рідкою фазою.

Було встановлено три гідродинамічні режими роботи тарілок провального типу:

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

Режим рівномірного барботажу характеризується однорідною за всіма напрямками структурою чарункуватої піни, горизонтальною вільною поверхнею барботажного шару, висота якої не змінюється з часом для одних і тих самих швидкостей газової і рідкої фаз. Це говорить про те, що у барботажному шарі сили тяжіння перевищують над силами інерції рідини.

За висотою барботажного шару  $H = 0,08 - 0,1$  мм починається режим

рухомого барботажного шару, який характерний відсутністю структурованої чарункуватої піною та криволінійною вільною поверхнею барботажного шару. Локальні висоти вільної поверхні барботажного шару змінюються з часом, також 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  $H = 0,08 - 0,1$  мм, при цьому рідина фаза барботажного шару є суцільною, а газова (парова) – дисперсною. Перш за все це стосується тарілок провального типу звичайного вільного перерізу (до 25%).

У роботі зроблено 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 за газом та рідиною, коли рідина фаза барботажного шару є суцільною, а газова (парова) – дисперсною;
- початок максимально ефективної роботи тарілок провального типу необхідно вважати за настанням режиму рухомого барботажного шару.

Авторами було зроблено розрахунки з написаних вище рівнянь та отримано результати у вигляді графіків.



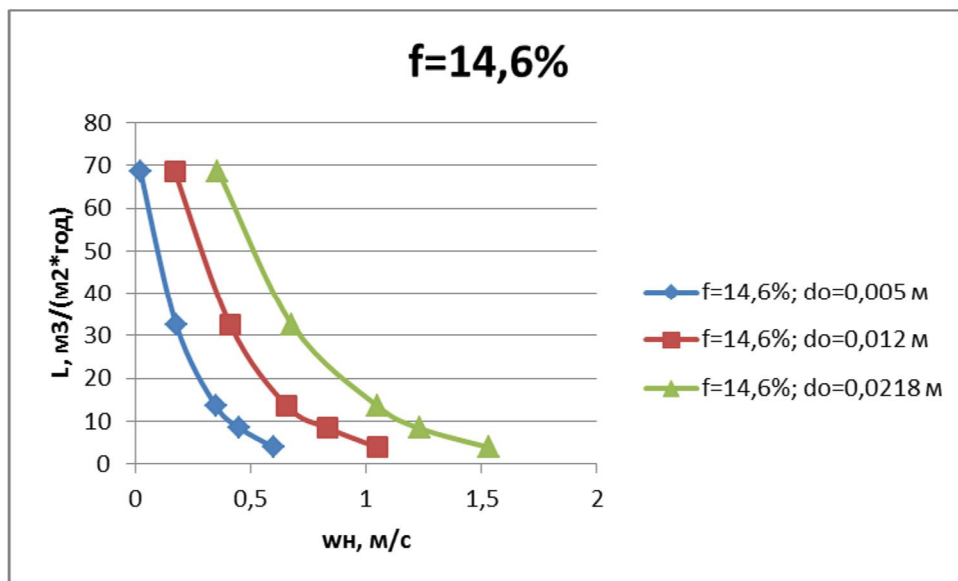


Рис. 11 Залежність  $w_n = f(L)$  для тарілок провального типу з вільним перерізом  $f = 14,6\%$  і різним діаметром отворів.

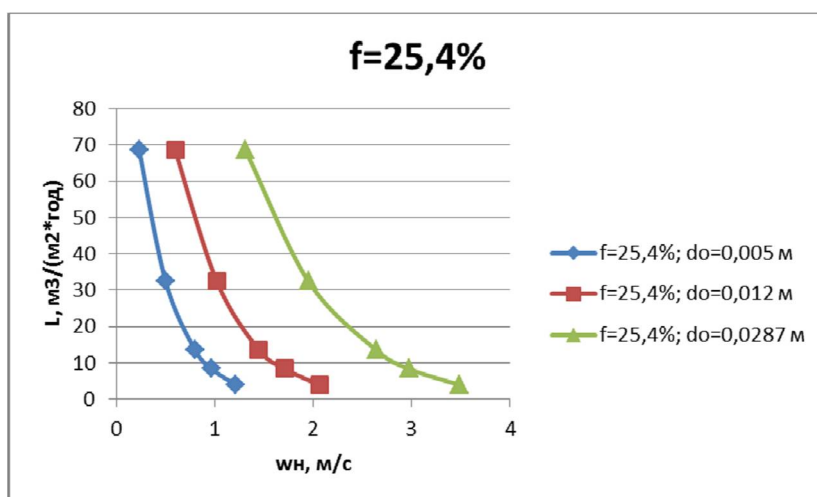


Рис. 12 Залежність  $w_n = f(L)$  для тарілок провального типу з вільним перерізом  $f = 25,4\%$  і різним діаметром отворів

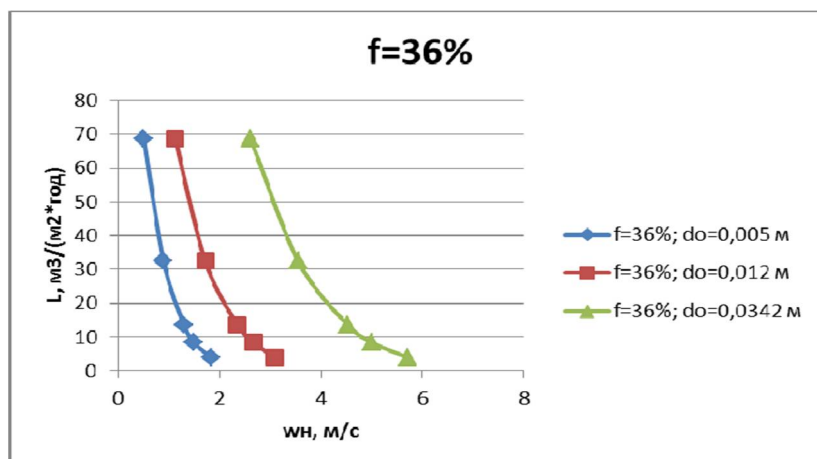


Рис. 13 Залежність  $w_n = f(L)$  для тарілок провального типу з вільним перерізом  $f = 36\%$  і різним діаметром отворів

Нижню межу роботи тарілок провального типу, на підставі літературних даних [19], приймемо швидкість газу у перерізі колони, яка відповідає початку режиму рухомого барботажного шару на дірчастих тарілках провального типу (точці біфуркації).

- $L$  – щільність зрошення,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ;
- $w_n$  – швидкість газу в повному перерізі колони, що відповідає нижній межі роботи дірчастих тарілок провального типу,  $\text{м}/\text{с}$ .

З отриманих графіків, авторами зроблено такі висновки:

1. Існуючі у літературних джерелах рівняння для розрахунку діапазону стійкої роботи тарілок провального типу не можуть бути застосовані для тарілок діаметром  $D = 0,057 \text{ м}$ .
2. Нижня межа роботи дірчастих 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 нормальною.
4. Отримані експериментальні дані не підтвердилися розрахунковими даними з цієї роботи. Вони показали лише значно меншу залежність меж роботи від діаметрів отворів. Тому необхідно ще проводити подальші дослідження на лабораторних установках.

## 5. Теорія масштабного переходу

Останніми роками було сформульовано нову теорію масштабного переходу [24]. Вона виявилася гідродинамічною, зумовлена нерівномірністю розподілу потоків і співвідношенням фаз по перерізу промислових апаратів, посиленням поздовжнього перемішування при збільшенні розмірів, що визначають масштаб турбулентності або виникнення циркулюючих контурів. Ці ефекти характеризують структуру потоків, у більшості випадків вони не моделюються на малих апаратах та при сучасному рівні розвитку гідродинаміки потоків не можуть бути передбачені методом математичного моделювання. Однак через те, що масштабний ефект має гідродинамічну природу, то його можна усувати на гідродинамічних стендах без необхідності технологічних випробувань, забезпечивши за допомогою конструктивних заходів зменшення гідродинамічних неоднорідностей та необхідну структуру потоків у великому апараті. Такий спосіб розробки промислових апаратів назвали гідромоделюванням, він дозволяє значно прискорити і удешевити перехід до промислових установок від лабораторних.

У цей час розроблена наближена теорія масштабного ефекту, яка полегшує пошук конструктивних заходів для усунення, а також залишкових неоднорідностей з метою визначення ефективності промислових апаратів, без технологічних випробувань.

Спостерігалось зменшення ККД і для провальних барботажних тарілок (майже в 3 рази, коли збільшували діаметр від 0,8 до 5 м.)

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

Встановлюють зв'язок між гідравлічними параметрами колон малого і великого діаметру за допомогою експерименту. Далі проводять

технологічні випробування масо- та теплообміну. Технологічні параметри, за даними гідродинамічного моделювання, отримані в колонах малого діаметру, переносять на колони великого діаметру з дослідницьких установок.

Вельми важливим 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 апарату потрібно обов'язково використовувати експериментальні установки з колонами невеликого діаметру та результати досліджень цих установок потрібно використовувати при розрахунку промислових апаратів.

Для розрахунку точки біфуркації барботажного слою на тарілках провального типу у роботі [8] запропоновано рівняння (7).

$$\lg\left(\frac{Y}{T^{0,5}}\right) = 0,0751 - 1,68 \cdot X \quad (7)$$

У рівняння (1) входить коефіцієнт  $T$ , який є відношенням суми периметрів усіх отворів плато тарілки до її діаметру [6]. Отже параметр  $T$  є функцією таких геометричних параметрів тарілки провального типу, як її діаметр, вільний перетин і діаметр отворів плато тарілки. За допомогою цього можна розраховувати за рівнянням [8] вільний перетин тарілок провального типу по заданій швидкості, розрахованій на повний переріз колони, для різних діаметрів колони.

Це уможливило гідродинамічне моделювання тарілок провального типу з різними геометричними характеристиками [8].

6. Опис експериментальної установки для гідравлічних і кінетичних досліджень тарілок провального типу з колоною  $D = 0,057$  м.

Для дослідження дірчатих тарілок провального типу було використано експеримент з колоною діаметру:  $D = 0,057$  м.

6.1 Опис експериментальної установки з колоною  $D = 0,057$  м:

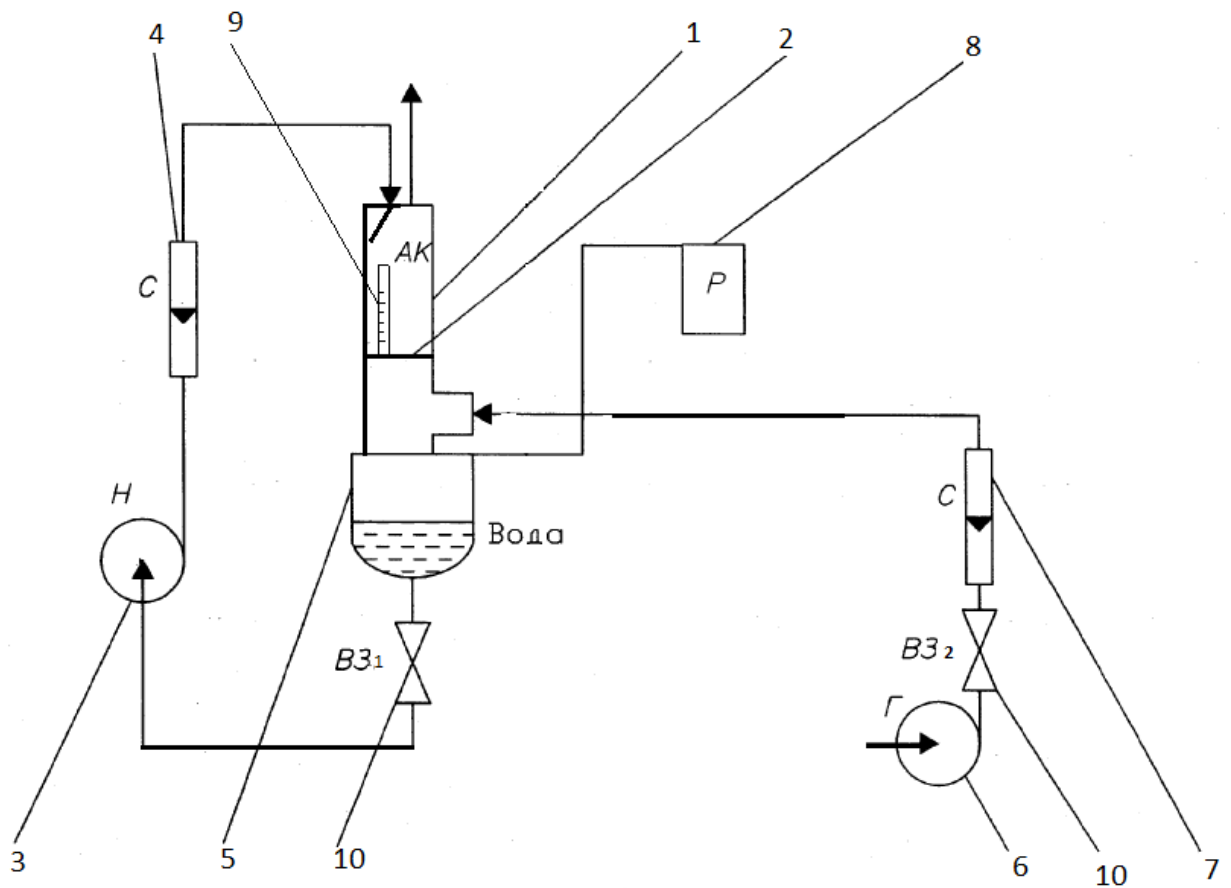


Рис. 14 Схема експериментальної установки для гідравлічних та кінетичних досліджень тарілок провального типу

з колоною  $D = 0,057$  м:

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

## 6.2 Схема лабораторної установки

Установка являє собою колону 1, з установленою в ній дірчатою тарілкою провального типу 2. За допомогою насосу 3 вода подається через вентиль ВЗ<sub>1</sub> та ротаметр 4 (РСПЗ СК №134) у верхню частину колони на внутрішню стінку. Пройшовши через тарілку, вода потрапляє до куба колони 5. Повітря за допомогою газодувки 6 через вентиль ВЗ<sub>2</sub> і ротаметр 7 (ТЛП №9101) подається до колони до місця, що розташоване нижче тарілки для забезпечення протитоку і тим самим утворення барботажного шару. Гідравлічний опір вимірюється манометром 8. Лінійкою 9, вимірюється висота піни. Витрати рідини і повітря регулюються вентилями 10.

## 6.3 Експериментальне дослідження

Рідина за допомогою насосу 3 подається у верхню частину, по перерізу колони 1, для того, щоб досягти більш рівномірного розподілу рідини й тим самим зменшити гідравлічний опір газу після тарілки, рідину подають на стінку колони. Установлюємо за ротаметром 4 витрату рідини, котрій відповідає певна щільність зрошування.

Знизу під тарілку 2 за допомогою газодувки 6 подаємо повітря. Його витрату встановлюємо 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 та рідині вимірюємо гідравлічний опір дифманометром 8 і висоту піни лінійкою 9. Особлива увага приділяється зміні режимів на тарільці: від режиму рівномірного барботажа до режиму нерівномірного газо-рідинного шару (точка біфуркації).

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

Висоту піни вимірюємо за допомогою сантиметрової лінійки.

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

#### 6.4 Пуск колони

Подається напруга в мережі, після чого включається насос 1, відкривається кульовий кран 9, встановлюється по ротаметру витрата рідини, котра відповідає певній щільності зрошення. Потім включається газодувка 6. За допомогою рідинного дифманометра 3 виставляється витрата газу. Витрати рідини й повітря регулюються вентилями 6 і 19

#### 6.5 Зупинка колони

Відключається насос 1, відключається газодувки 2, закривається вентиль 6, вентиль 19 і шаровий кран 9.

## 7. Експериментальні дані

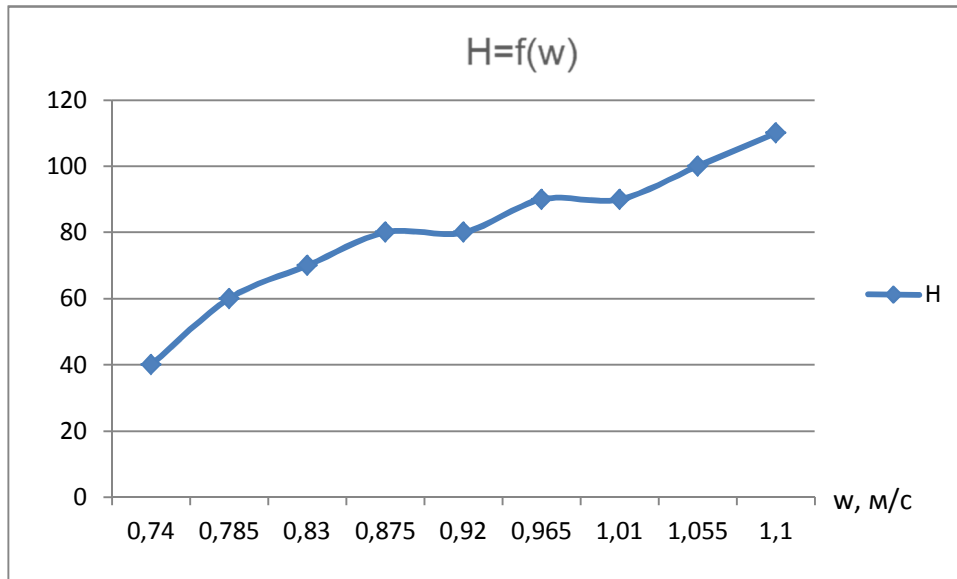


Рис.3 Залежність висоти газорідного шару від швидкості пари

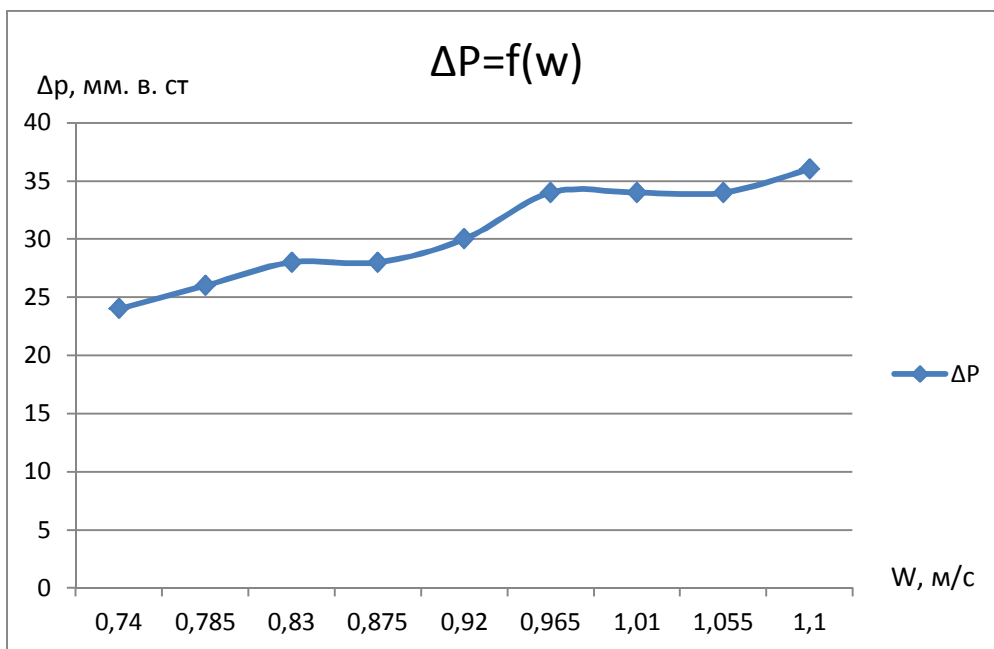


Рис.4 Залежність гідравлічного опору газорідного шару від швидкості пари

Були проведені дослід на тарілках провального типу  $D=0.057$  м, вільний перетин склав  $f=16\%$ . За допомогою розрахунку було виявлено, що з графіку залежності висоти від швидкості точки біфуркації при висоті газорідного шару 100 мм швидкість газу дорівнює 0,9 м/с. Розрахунком було встановлено що точка біфуркації в промисловій колоні досягається при швидкості пари 1 м/с. Отримали співпадіння



експериментальних і розрахункових значень в точці біфуркації, коли режим роботи тарілки провального типу досягає максимальної ефективності. В експериментальній колоні гідравлічний опір тарілки в режимі рухомого барботажного шару відповідає гідравлічному опору, який наглядно ілюструється на графіку: 34 мм в. ст. На основі гідравлічного моделювання допускаємо, що гідравлічний опір тарілки провального типу в промисловій колоні в режимі рухомого барботажного шару буде складати 34 мм в. ст.

## 8. Розрахунок основних параметрів роботи колони

У ректифікаційній колоні з дірчатими тарілками передбачається поділ суміші нітратної кислоти – пентаоксид діазоту при надлишковому тиску 10000 мм вод. ст.

Характеристика пентаоксид діазоту (низько киплячий компонент):

$M_a = 71,7$  - молекулярна маса пентаоксид діазоту;

$T_a = 45$  °С - температура кипіння;

$\rho_a = 1630$  кг/м<sup>3</sup> - густина пентаоксид діазоту при 20°С.

Характеристика 70% азотної кислоти (висококиплячий компонент):

$M_b = 49,5$  - молекулярна маса 70% азотної кислоти;

$T_b = 122$  °С - температура кипіння 70% азотної кислоти;

$\rho_b = 1413$  кг/м<sup>3</sup> - густина 70% азотної кислоти при 20°С.

Кількість одержуваного дистилляту, кг/с:

$$G_p = \frac{G}{T \cdot 24 \cdot 3600} \quad (8)$$

де  $G = 5000$  кг/рік - необхідна продуктивність колони по пентаоксид діазоту;

$T = 335$  днів - ефективний фонд робочого часу за рік.

$$G_p = \frac{10000000}{335 \cdot 24 \cdot 3600} = 0,267 \text{ кг/сек} = 1033 \text{ кг/год}$$

Кількості вихідної суміші й кубового залишку визначається шляхом рішення рівняння матеріального балансу для низькокиплячого компоненту

$$G_f = G_p + G_w \quad (9)$$

$$G_f a_f = G_p a_p + G_w a_w \quad (10)$$

Кількість вихідної суміші

$$G_f = \frac{G_p (a_p - a_w)}{a_f - a_w} \quad (11)$$

$a_f=93,3\%$  - масовий склад вихідної суміші;

$a_p=100\%$ - масовий склад дистиляту;

$a_w=76,2\%$ - масовий склад кубового залишку.

$$G_f = \frac{0,267 \cdot (1 - 0,762)}{0,933 - 0,762} = 0,47948 \text{ кг/с}$$

Кількість кубового залишку

$$G_w = G_f - G_p \quad (12)$$

$$G_w = 0,47948 - 0,267 = 0,13498 \text{ кг/с}$$

Перевірка матеріального балансу за рівнянням

$$G_f a_f = G_p a_p + G_w a_w \quad (13)$$

$$0,479 \cdot 0,933 = 0,267 \cdot 1 + 0,13498 \cdot 0,762$$

$$0,44691 = 0,44735$$

Розходження:

$$0,44735 - 0,44691 = 0,000443$$

Помилка:

$$\frac{0,000443}{0,44691} \cdot 100\% = 0,099125\%$$

Таблиця № 1 Параметри колони

№ потоку	1	2	3
Температура, °C	50	45	122
Тиск			

в верху колони, МПа (надп.)			
в внизу колони, МПа (надп.)			0,1
Витрати пари			
Витрати рідини, кг/сек	0,479	0,344	0,134
Витрати газу			
Масовий склад ваговий, %			
HNO <sub>3</sub> +N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	93,3%	100%	76,2%
	6,7%	0%	23,8%
Склад потоку:			
Вихідна суміш, кг/сек	0,479		
Кількість дистилляту, кг/сек		0,344	
Кубовий залишок, кг/сек			0,134

Примітка:

Поток №1 – потік вихідна суміш

Поток №2 – потік виходу дисцилята суміш

Поток №3 – потік кубовий залишок

## 8.1 Матеріальний баланс колони

Потужність виробництва 5000 т/рік або 1250 кг/год.

Вміст суміші нітратної кислоти – пентаоксид діазоту:

$N_2O_4$  – 25%

$HNO_3$  – 69,85%

$H_2O$  – 5%

$I_2$  – 0,15%

Вихідна суміш 1250 кг/год:

$N_2O_4$  – 312кг/год

$HNO_3$  – 873 кг/год

$H_2O$  – 63 кг/год

$I_2$  – 2 кг/год

Дистилят 1033 кг:

$N_2O_4$  – 312 кг/год

$HNO_3$  – 721 кг/год

Кубовий залишок 217 кг/год:

$HNO_3$  – 152 кг/год

$H_2O$  – 63 кг/год

$I_2$  – 2 кг/год

Перевірка матеріального балансу:

1250 кг/год = 1033 кг/год + 217 кг/год;

1250 кг/год = 1250 кг/год - Вірно.

Оптимальне флегмове число повинно бути втричі більше за кількість відбираємого дистиляту.  $R_{opt}=3,1$ .

## 8.2 Визначення середніх значень параметрів по колоні, фізико-хімічних і термодинамічних констант фаз

По рідкій фазі

Середня мольна концентрація в нижній частині колони

$$X_{cp^H} = \frac{X_W + X_F}{2} \quad (21)$$

$$X_{cp^H} = \frac{0.688 + 0.906}{2} = 0,797$$

Середня мольна концентрація у верхній частині колони

$$X_{cp^B} = \frac{X_F + X_P}{2} \quad (22)$$

$$X_{cp^B} = \frac{0.906 + 1}{2} = 0,953$$

Середня мольна концентрація по колоні

$$X_{cp} = \frac{X_{cp^H} + X_{cp^B}}{2} \quad (23)$$

$$X_{cp} = \frac{0.797 + 0.953}{2} = 0,875$$

Середня масова концентрація по колоні

$$a_{cp} = \frac{X_{cp} \cdot M_a}{X_{cp} \cdot M_a + (1 - X_{cp}) \cdot M_b} \quad (24)$$

$$a_{cp} = \frac{0,875 \cdot 71.7}{0,875 \cdot 71.7 + (1 - 0,875) \cdot 49.5} = 0.91$$

Для визначення значень  $t_{XW}$ ,  $t_{XF}$ ,  $t_{XP}$  будується діаграма рівноважного складу рідини (X) і пари (Y) в мол.% і температури кипіння подвійної суміші «нітратна кислота – пентаоксид діазоту» при 10000 Па (абс.) за даними таблиці 1.

Табл. 3 Мольні концентрації

$x_w =$ 0,688(мол.)
$x_f = 0,906$

(мол.)
$x_p =$ 1(мол.)
$y_w =$ 0,016824(мол.)
$y_f^* =$ 0,999(мол.)
$y_p = 0,999$ (мол.)

Таблиця № 4 Залежність складу суміші (нітратна кислота – пентаоксид діазоту) від температури

X	Y	°C
4	59	77
8	80	68
12	88	62
16	92	54
20	93	51
24	95	46
28	96	42
32	97	37
36	98	33
40	98	29
44	99	25
49	99	24,5

Температура подачі вихідної суміші, °C

при  $X_F = 0,906$   $t_{XF} = 50$  °C

Температура виходу дистиляту, °C

при  $X_p = 1$   $t_{XP} = 45$  °C

Температура виходу кубового залишку, °C

при  $X_w = 0,688$   $t_{XW} = 122$  °C

Середня температура в нижній частині колони, °C

$$t_{Xcp}^H = \frac{t_{XW} + t_{XF}}{2} \quad (25)$$

$$t_{Xcp}^H = \frac{122 + 50}{2} = 86$$
 °C

Середня температура у верхній частині колони, °C

$$t_{Xcp}^B = \frac{t_{XF} + t_{XP}}{2} \quad (26)$$

$$t_{Xcp}^B = \frac{50 + 45}{2} = 47,5$$
 °C

Середня температура по колоні, °C

$$t_{Xcp}^B = \frac{t_{Xcp}^H + t_{Xcp}^B}{2} \quad (27)$$

$$t_{Xcp}^B = \frac{86 + 47,5}{2} = 66,75$$
 °C

*Середня молекулярна маса*

$$M_{Xcp} = M_a \cdot X_{cp} + M_e \cdot (1 - X_{cp}) \quad (28)$$

$$M_{Xcp} = 71,7 \cdot 0,875 + 49,5 \cdot (1 - 0,875) = 68,925$$

Середня густина, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{Xcp} = \frac{\rho_a \cdot \rho_e}{\rho_e \cdot a_{cp} + \rho_a \cdot (1 - a_{cp})} \quad (29)$$

$\rho_a = 1520$  кг/м<sup>3</sup> - густина пентаоксид діазоту, при  $t_{Xcp} = 66,75$  °C;

$\rho_b = 1301$  кг/м<sup>3</sup> - густина 70% азотної кислоти, при  $t_{Xcp} = 66,75$  °C

$$\rho_{Xcp} = \frac{1520 \cdot 1301}{1301 \cdot 0,91 + 1520 \cdot (1 - 0,91)} = 1497 \text{ кг/м}^3 \quad [14]$$

Середня в'язкість

$$\lg \mu_{Xcp} = X_{cp} \cdot \lg \mu_a + (1 - X_{cp}) \cdot \lg \mu_b \quad (30)$$



$$t_{Xcp} = 66,75^{\circ}\text{C}$$

$$X_{cp} = 0,875$$

$\mu_a = 0,39$  спз – в'язкість низькокиплячого компонента при середній температурі  $t_{Xcp} = 66,75^{\circ}\text{C}$

$\mu_b = 0,5$  спз – в'язкість висококиплячого компонента при середній температурі  $t_{Xcp} = 66,75^{\circ}\text{C}$  [14]

$$\text{Lg}\mu_{Xcp} = 0,875 \cdot \text{Lg}0,39 + (1 - 0,875) \cdot \text{Lg}0,5 = -0,398$$

$$\mu_{Xcp} = 0,4023 \text{спз} = 0,4023 \text{мПа}\cdot\text{с} = 0,4023 \cdot 10^{-3} \text{Па}\cdot\text{с}$$

Середня поверхня натягу, дин/см

$$\sigma_{cp} = \sigma_a \cdot X_{cp} + \sigma_b \cdot (1 - X_{cp}) \quad (31)$$

$\sigma_a = 1,46$  дин/см - поверхневий натяг низькокиплячого компоненту при

температурі  $t_{Xcp} = 66,75^{\circ}\text{C}$

$\sigma_b = 18 \cdot 10^3$  н/м дин/см - поверхневий натяг висококиплячого компоненту при температурі  $t_{Xcp} = 66,75^{\circ}\text{C}$

$$\sigma_{cp} = 1,46 \cdot 0,875 + 18 \cdot (1 - 0,875) = 3,49 \text{дин/см} \quad (3,49 \cdot 10^3 \text{Н/м})$$

70% азотної кислоти –  $\sigma = 1,46 \cdot 10^3$  Н/м

пентаоксид діазоту –  $\sigma = 18 \cdot 10^3$  Н/м

По газовій фазі

*Середня мольна концентрація в нижній частині колони, мол.*

$$Y_{cp}^H = \frac{Y_W + Y_F}{2} \quad (32)$$

$$Y_{cp}^H = \frac{0,017 + 0,999}{2} = 0,5081 \text{ мол.}$$

*Середня мольна концентрація у верхній частині колони, мол.*

$$Y_{cp}^B = \frac{Y_F + Y_P}{2} \quad (33)$$

$$Y_{cp}^B = \frac{0,999 + 0,999}{2} = 0,9991, \text{ мол.}$$

*Середня мольна концентрація по колоні, мол.*

$$Y_{cp} = \frac{Y_{cp}^H + Y_{cp}^B}{2} \quad (34)$$

$$Y_{cp} = \frac{0,5081 + 0,9991}{2} = 0,7536, \text{ мол.}$$

Температура подачі вихідної суміші, при

$$Y_F = 0,999; \quad t_{YF} = 54^{\circ}\text{C};$$

Температура виходу дистилляту:

$$Y_P = 0,999; \quad t_{YP} = 45^{\circ}\text{C};$$

Температура подачі кубового залишку:

$$Y_W = 0,017; \quad t_{YW} = 122^{\circ}\text{C};$$

Середня температура в нижній частині колони,  $^{\circ}\text{C}$

$$t_{Ycp}^H = \frac{t_{YW} + t_{YF}}{2} \quad (35)$$

$$t_{Ycp}^H = \frac{122 + 54}{2} = 88, \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Середня температура у верхній частині колони,  $^{\circ}\text{C}$

$$t_{Ycp}^B = \frac{t_{YF} + t_{YP}}{2} \quad (36)$$

$$t_{Ycp}^B = \frac{54 + 45}{2} = 49,5, \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Середня температура по колоні,  $^{\circ}\text{C}$

$$t_{Ycp} = \frac{t_{Ycp}^H + t_{Ycp}^B}{2} \quad (37)$$

$$t_{Ycp} = \frac{88 + 49,5}{2} = 68,75, \text{ }^{\circ}\text{C}$$

*Середня молекулярна маса*

$$M_{Ycp} = M_a \cdot Y_{cp} + M_e \cdot (1 - Y_{cp}) \quad (38)$$

$$M_{Ycp} = 71,7 \cdot 0,7536 + 49,5 \cdot (1 - 0,7536) = 66,23$$

Середня густина,  $\text{кг/м}^3$

$$\rho_{Ycp} = \frac{M_{Ycp} \cdot p \cdot T_o}{22,4 \cdot p_o \cdot T} \quad (39)$$

$T$  - середня температура по колоні,  $^{\circ}\text{K}$

$$F = \frac{V}{w} \quad (40)$$

$$T = t_{\text{ycp}} + T_0 \quad (41)$$

$T_0 = 273^{\circ}\text{K}$  - точка плавлення льоду;

$P_0 = 1 \text{ кгс/см}^2$  - нормальний атмосферний тиск;

$P = 4,1 \text{ кгс/см}^2$  - абсолютний робочий тиск у колоні

$$T = 68,75 + 273 = 341,75^{\circ}\text{K}$$

$$\rho_{\text{ycp}} = \frac{66,23 \cdot 10100 \cdot 273}{22,4 \cdot 1 \cdot 10100 \cdot 341,75} = 2,361 \text{ кг/м}^3$$

### 8.3 Визначення основних геометричних параметрів колони

$$\text{Діаметр колони } D_k = \sqrt{\frac{V_Y}{0,785 \cdot \omega_Y}} \quad (42)$$

$V_Y$  - об'ємна витрата пари, м<sup>3</sup>/сек

$\omega_Y$  - швидкість пари, віднесена до повного перерізу колони, м/сек

$$V_Y = \frac{G_Y}{\rho_{Ycp}} \quad (43)$$

$G_Y$  - кількість пари, що піднімається по колоні, кг/сек

$$G_Y = G_p (R_{om} + 1) \quad (44)$$

$$G_Y = 0,345 \cdot (3,099 + 1)$$

$$G_Y = 1,104 \text{ кг/сек}$$

$$V_{Ycp} = \frac{1,104}{2,361} = 0,48 \text{ м}^3/\text{сек}$$

Рекомендована швидкість пари у колоні

$$w = 1,5 \text{ м/с}$$

$$0,785 D^2 = \frac{V}{w} \quad (45)$$

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}} \quad (46)$$

$$D = \sqrt{\frac{0,483}{0,785 \cdot 1,5}} = 0,64 \text{ м}$$

Приймаємо діаметр колони  $D = 0,8 \text{ м}$ ,

тоді швидкість пари, що розраховується на повний переріз колони,

буде складати

$$w = \frac{V}{0,785 \cdot D^2} = \frac{0,483}{0,785 \cdot 0,8^2} = 0,9609 \text{ м/с}$$

Приймаємо  $w = 1,0 \text{ м/с}$

## 9. Матеріал колони

Для колони ректифікації вибираємо матеріал в залежності від фізико-хімічних властивостей речовини, яка приймає участь у процесі ректифікації.

Сталь 02X8H22C6 (EP794) корозійностійка жароміцна аустенітного класу.

Сталь 02X8H22C6 (EP794) застосовується: для виготовлення зварного хімічного обладнання, що працює під впливом концентрованої азотної кислоти при високих температурах (85% -ва концентрація і вище при температурі до 100 °C). Сталь виплавляється тільки спеціальними методами - Ш, ПД, ВД. [15]

### Хімічний склад у %

НТД	C	S	P	Mn	Cr	Si	Ni	Fe
ТУ 14-1-3812-84, ТУ 14-3-1024-81	≤0,020	≤0,020	≤0,030	≤0,60	7,50-10,00	5,40-6,70	21,0-23,0	Ост.

По ТУ 14-3-1024-81, ТУ 14-1-3812-84 хімічний склад наведено для сталі марки 02X8H22C6 (EP794).

02X8H22C6 (EP794) має у складі: C=0.02%, Cr=8%, Ni=22%, Si=6%.

### Механичні властивості

#### Механичні властивості при 20°C

Переріз (мм)	t випроб. (°C)	t відпуски (°C)	$\sigma_T$   $\sigma_{0,2}$ (МПа)	$\sigma_B$ (МПа)	$\delta_5$ (%)	$\delta_4$	$\delta$	$\delta_{10}$	$\psi$ (%)	KCU (кДж/м <sup>2</sup> )
Сортовий прокат гарячекатаний і кований по СТП 26.260.484-2004. Закалка у воду з 1050-1070°										
Зразок			≥200	≥540	≥40					
Труби холоднодеформовані і теплодеформовані в стані поставки по ТУ 14-3-1024-81										
Зразок			≥196	≥588	≥35					

### Технологічні властивості

Особливості термічної обробки. Вироби зі сталі піддають гарту в воду з 1050 ° C. Час витримки при нагріванні під загартування для виробів з товщиною стінки до 10 мм - 30 хв, понад 10 мм - 20 хв + 1 хв на 1 мм максимальної товщини.

## Позначення

Механічні властивості:

$\sigma_b$  - Межа короткочасної міцності, [МПа]

$\sigma_T$  - Межа плинності, [МПа]

$\sigma_{0,2}$  - Межа пропорційності (допуск на залишкову деформацію - 0,2%), [МПа]

$\delta_5$  - Відносне подовження при розриві, [%]

$\psi$  - Відносне звуження, [%]

KCU - ударна в'язкість, [кДж / м<sup>2</sup>]

HB - Твердість по Брінеллю, [МПа]

HV - твердість по Віккерсу, [МПа]

HSh - Твердість по Шору, [МПа]

10. Розрахунок вільного перерізу тарілки провального типу  $D = 0,8$  м

Визначаємо вільний переріз тарілок провального типу в колонні  $D = 0,8$  м

Розрахунок проводиться за формулою (7)

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

$$X = \left(\frac{G_p}{G_n}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_p}\right)^{1/8} \quad (47)$$

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_e}\right)^{0,16} \quad (48)$$

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

$$G_{\text{рід}} = 1033 \cdot 4 = 4132 \text{ кг / год.}$$

$$G_{\text{п}} = G_v = 3099, \text{ кг/сек}$$

$G_{\text{ф}}$  – кількість флегми, кг/год;

$G_{\text{ф}}$  – кількість вихідної суміши, кг/год;

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

$\rho_{\text{рід}}$  і  $\rho_{\text{п}}$  – питомі ваги газу (пара) і рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;

$d_0$  – діаметр отворів в тарілці, м;

$f$  – вільний переріз тарілки, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>;

$\mu_{\text{рід}}$  – в'язкість рідини, Па·с;

$\mu_e$  – в'язкість води при, 20°, Па·с;

$V$  – витрата пари, м<sup>3</sup>/с;

$a, B$  – коефіцієнти;

$L$  – щільність зрошення, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>год);

$S$  – площа колони, м<sup>2</sup>

$D$  – внутрішній діаметр колони, м;

$\Sigma$  – площа суми отворів, м<sup>2</sup>;

$S_0$  – площа отвору, м<sup>2</sup>;

$N$  – кількість отворів, шт;

$P$  – периметр отворів, м

$T$  – коефіцієнт

Розрахунок кількості кубового залишку

$$G_w = G_f - G_p \quad (50)$$

$$G_w = 0,479 - 0,344 = 0,134 \text{ кг/с}$$

$$V = 0,483 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$a = -1,68;$$

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

$$L = G_p / S \quad (51)$$

$$L = 3099 / (1413 \cdot 0,5) = 4,39 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ год})$$

Розраховується кількість флегми

$$R = (F - G_p) \quad (52)$$

$$R \cdot G_p = F - G_p \quad (53)$$

$$R \cdot G_p + G_p = G_\phi \quad (54)$$

$$3,1 \cdot 1,033 + 1,033 = 4,23 \text{ кг/с}$$

Кількість флегми,  $\text{кг/год}$ ;

$$G_\phi = 4,23 \text{ кг/с} = 1524,7 \text{ кг/год}$$

Розраховується кількість рідини, що проходить крізь низ колони,  $\text{кг/год}$ ;

$$G_n = G_\phi + G_f \quad (55)$$

де  $G_f$  – кількість вихідної суміші,  $\text{кг/год}$ ;

$$G_f = 0,479 \text{ кг/сек}$$

$$G_n = 1,067 + 0,479 = 1,546 \text{ кг/с} = 3099 \text{ кг/год}$$

Розраховуємо вагові швидкості рідини,  $\text{кг/год}$ ;

$$G_{\text{рід}} = (G_\phi + G_n) / 2 \quad (56)$$

$$G_{\text{рід}} = (4132 + 3099) / 2 = 3615,5 \text{ кг/год.}$$

Визначаються розрахункові параметри

За рівнянням (7) розраховується перша інтеграція при  $f = 0,06\%$

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



де  $Y$  розраховується за формулою (48)

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

де  $w$  – рекомендована швидкість пари у колоні

$$w = 1,0 \text{ м/с}$$

$\rho_p$  – питома вага рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;

$$\rho_p = 1497 \text{ кг/м}^3;$$

$\rho_z$  – питома вага газу (пара),  $\text{кг/м}^3$ ;

$$\rho_z = 2,361 \text{ кг/м}^3;$$

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

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2;$$

$d_0$  – діаметр отворів в тарілці, м;

$$d_0 = 0,012 \text{ м}$$

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

$$\mu_p = 0,4023 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с};$$

$\mu_g$  – в'язкість азотної кислоти при,  $20^\circ$ ,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;

$$\mu_g = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с};$$

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,06^2} \cdot \frac{2,361}{1497} \cdot \left( \frac{0,4023 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 4,98$$

$T$  – коефіцієнт, який розраховується за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D} \quad (57)$$

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

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n \quad (58)$$

де  $\Pi$  – периметр отворів, м

$$\Pi = \pi \cdot d_0 \quad (59)$$

$$\Pi = \pi d_0 = 3,14 \cdot 0,008 = 0,2512 \text{ , м}$$

Розраховується площу всіх отворів,  $\text{м}^2$

$$S_0 = S \cdot f \quad (60)$$

де –  $S$  площа колони,  $\text{м}^2$

$$S = 0,785 \cdot D^2 \quad (61)$$

$$S = 0,785D^2 = 0,785 \cdot 0,8^2 = 0,5 \text{ м}^2$$

$$S_o = 0,06 \cdot 0,5 = 0,03, \text{ м}^2$$

Розраховується площу одного отвору,  $\text{м}^2$

$$S'_0 = \pi \cdot R^2 \quad (62)$$

$$S'_0 = \pi \cdot R^2 = 3,14 \cdot 0,004^2 = 0,000051 \text{ м}^2$$

Розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

$$n = \frac{S_o}{S'_0} \quad (63)$$

$$n = \frac{0,03}{0,000051} = 588,23 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,2512 \cdot 588,23 = 147,76 \text{ м}$$

$$T = \frac{147,76}{0,8} = 184,7$$

За рівнянням (47) розраховується  $X$

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

$$X = \left( \frac{3099}{4132} \right)^{1/4} \cdot \left( \frac{2,361}{1497} \right)^{1/8} = 0,415$$

$$Lg(0,02 / 184,7^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-0,43 = -0,622$$

$$\Delta = 0,19$$

За рівнянням (7) розраховується друга інтеграція при  $f = 0,08\%$

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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,08^2} \cdot \frac{2,361}{1497} \cdot \left( \frac{0,4023 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 2,813$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (57)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (58)

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

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

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 0,5 \cdot 0,08 = 0,04, m^2$$

За формулою (63) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

$$n = \frac{S_0}{S'_0} = \frac{0,04}{0,000051} = 784,314 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,02512 \cdot 784,314 = 197,02 \text{ м}$$

$$T = \frac{197,02}{0,8} = 246,27$$

$$Lg(2,813 / 246,27^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-0,746 = -0,622$$

$$\Delta = 0,124$$

За рівнянням (7) розраховується третя інтеграція при  $f = 0,1\%$

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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,1^2} \cdot \frac{2,361}{1497} \cdot \left( \frac{0,4023 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 1,8$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (57)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (58)

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

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

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 0,5 \cdot 0,1 = 0,05, \text{ м}^2$$

За формулою (63) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

$$n = \frac{S_0}{S'_0} = \frac{0,05}{0,000051} = 980,39 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,2512 \cdot 980,39 = 246,27 \text{ м}$$

$$T = \frac{246,27}{0,8} = 307,84$$

$$\text{Lg}(1,8 / 307,84^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-0,99 = -0,622$$

$$\Delta = 0,368$$

За рівнянням (7) розраховується четверта інтеграція при  $f = 0,16\%$

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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,16^2} \cdot \frac{2,361}{1497} \cdot \left( \frac{0,4023 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,703$$

Розраховується кофіцієнт T за формулою (57)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (58)

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

За формулою (60) розраховується площу всіх отворів, м<sup>2</sup>

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 0,5 \cdot 0,16 = 0,08, \text{ м}^2$$

За формулою (63) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

$$n = \frac{S_0}{S'_0} = \frac{0,08}{0,000051} = 1568,63 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,2512 \cdot 1568,63 = 394,04 \text{ м}$$

$$T = \frac{394,04}{0,8} = 492,55$$

$$Lg(0,703 / 492,55^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-1,4992 = -0,622$$

$$\Delta = 0,877$$

За рівнянням (7) розраховується п'ята інтеграція при  $f = 0,2\%$

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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,2^2} \cdot \frac{2,361}{1497} \cdot \left( \frac{0,4023 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,45$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою (57)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (58)

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

За формулою (60) розраховується площу всіх отворів,  $\text{м}^2$

$$S_0 = S \cdot f$$

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

За формулою (63) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

$$n = \frac{0,1}{0,000051} = 1960,78 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,2512 \cdot 1960,78 = 492,55 \text{ м}$$

$$T = \frac{492,55}{0,8} = 615,69$$

$$Lg(0,45 / 615,69^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-1,74 = -0,622$$

$$\Delta = 1,118$$

За рівнянням (7) розраховується шоста інтеграція при  $f = 0,25\%$

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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,25^2} \cdot \frac{2,361}{1497} \cdot \left( \frac{0,4023 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,288$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (57)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (58)

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

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

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 0,5 \cdot 0,25 = 0,125, m^2$$

За формулою (63) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

$$n = \frac{0,125}{0,000051} = 2450,98 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,2512 \cdot 2450,98 = 615,69 \text{ м}$$

$$T = \frac{615,69}{0,8} = 769,61$$

$$Lg(0,288 / 769,61^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-1,98 = -0,622$$

$$\Delta = 1,358$$

За рівнянням (7) розраховується сьома інтеграція при  $f = 0,3\%$

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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,3^2} \cdot \frac{2,361}{1497} \cdot \left( \frac{0,4023 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,2$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (57)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (58)

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

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

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 0,5 \cdot 0,3 = 0,15, m^2$$

За формулою (63) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

$$n = \frac{0,15}{0,000051} = 2941,18 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,2512 \cdot 2941,18 = 738,82 \text{ м}$$

$$T = \frac{738,82}{0,8} = 923,53$$

$$Lg(0,2 / 923,53^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

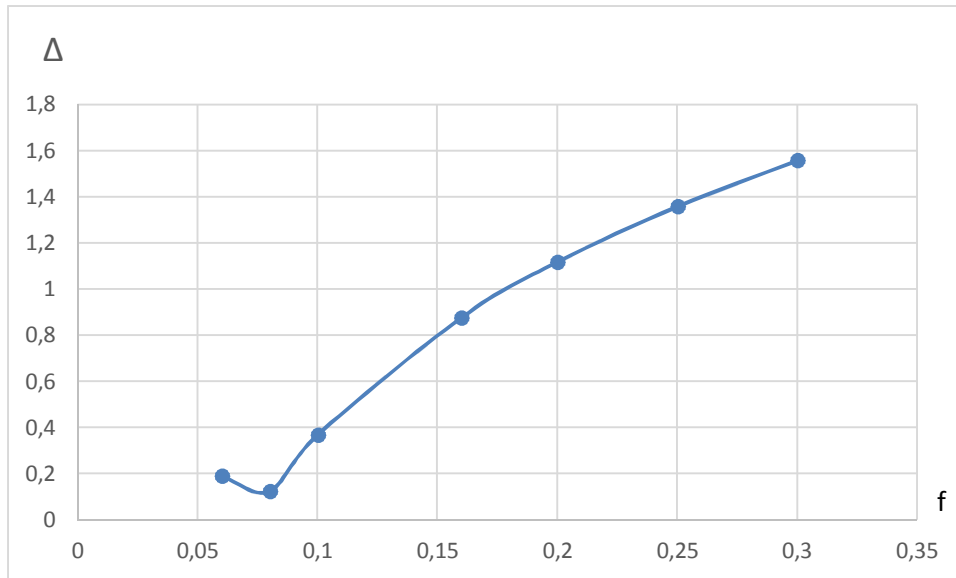
$$-2,18 = -0,622$$

$$\Delta = 1,558$$

Таблиця № 5 Залежність величин  $\Delta$  від вільного перетину  $f$

$f$	0,06	0,08	0,1	0,16	0,2	0,25	0,3
$\Delta$	0,19	0,124	0,368	0,877	1,118	1,358	1,558

Рис. №20 Графік залежності  $\Delta$  від вільного перетину  $f$



Величина  $\Delta$  є мінімальною на графіку у точці, яка відповідає вільному перетину  $f=0,08\%$ , тому для колони з діаметром  $D=0,8$  м вибираємо тарілки з вільним перетином  $f=0,08\%$ .

Визначаємо кількість отворів тарілки:

$$f = \frac{n_{\text{отв}} \cdot S_{\text{отв}}}{S} = \frac{n \cdot 0.785 \cdot 0.012^2}{0.8^2} = 0.08;$$

$$n = \frac{0.8^2 \cdot 0.08}{0.012^2} = 355.56 \approx 356 \text{ шт.}$$

#### 11. Розрахунок вільного перерізу тарілки провального типу $D = 0.057$ м

Приймаємо діаметр колони  $D = 0,057$  м. та рекомендована швидкість пари у колоні  $W = 1,0$  м/с



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

тоді

$$V = w \cdot 0,785 D^2 = 1 \cdot 0,785 \cdot 0,057^2 = 0,0026 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$G_n = V \cdot \rho_n$$

$$G_n = 0,0026 \cdot 2,361 = 0,006 \text{ кг/с}$$

Приймається щільність зрошування

$$L = 4,39, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год});$$

тоді кількість рідини в модельній колоні

$$G_p = L \cdot S$$

$$G_p = 3099 / 1413 = 2,19 \text{ кг/год}$$

$$\rho_p = 1497 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_n = 2,361 \text{ кг/м}^3;$$

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2;$$

$$d_0 = 0,012 \text{ м};$$

$$\mu_p = 0,4023 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\mu_s = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$V = 0,00051 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$a = -1,68;$$

$$B = 1,188;$$

$$D = 0,057 \text{ м};$$

Розраховується витрату пари, кг/с

$$V_n = S \cdot W$$

$$V_n = 0,00255 \cdot 1,0 = 0,00255 \text{ кг/с}$$

$$V_n = 0,00255 \text{ кг/с}$$

Розраховується витрату рідини, кг/с

$$V_p = L \cdot S$$

$$V_p = 4,39 \cdot 0,5 = 8,78 \text{ кг/с}$$

$$V_p = 8,78 \text{ кг/с}$$

За рівнянням (7) 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

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

де  $w$  – декомендована швидкість пари у колоні

$$w = 1,0$$

$\rho_p$  – питома вага рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;

$$\rho_p = 1497 \text{ кг/м}^3;$$

$\rho_z$  – питома вага газу (пара),  $\text{кг/м}^3$ ;

$$\rho_z = 2,361 \text{ кг/м}^3;$$

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

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2;$$

$d_0$  – діаметр отворів в тарілці, м;

$$d_0 = 0,012 \text{ м}$$

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

$$\mu_p = 0,4023 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$\mu_e$  – в'язкість води при,  $20^\circ$ ,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;

$$\mu_e = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,06^2} \cdot \frac{2,361}{1497} \cdot \left( \frac{0,4023 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 10$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (57)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (58)

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

За формулою (59) розраховується периметр отворів, м

$$\Pi = \pi d_0 = 3,14 \cdot 0,012 = 0,038, \text{ м}$$

За формулою (60) розраховується площу всіх отворів,  $\text{м}^2$

$$S_0 = S \cdot f$$

За формулою (61) розраховується площу колони,  $\text{м}^2$

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

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

За формулою (62) розраховується площу одного отвору, м<sup>2</sup>

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

$$S'_0 = \pi \cdot R^2 = 3,14 \cdot 0,006^2 = 0,00011 \text{ м}^2$$

За формулою (63) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

$$n = \frac{0,000153}{0,00011} = 1,39 = 2 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,038 \cdot 2 = 0,076 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,076}{0,057} = 1,321$$

$X$  – комплекс нанесений на осі абсцис

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

$$X = \left( \frac{3,099}{4,132} \right)^{1/4} \cdot \left( \frac{2,361}{1497} \right)^{1/8} = 0,415$$

$$Lg(10/1,321^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-1,48 = -0,62$$

$$\Delta = 0,86$$

За рівнянням (7) 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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,08^2} \cdot \frac{2,361}{1497} \cdot \left( \frac{0,4023 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 1,88$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (57)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (58)

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

За формулою (60) розраховується площу всіх отворів, м<sup>2</sup>

$$S_0 = S \cdot f$$

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

За формулою (63) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

$$n = \frac{0,000204}{0,000051} = 4 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,02512 \cdot 4 = 0,1 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,1}{0,057} = 1,754$$

$$Lg(1,88 / 1,754^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$0,15 = -0,62$$

$$\Delta = 0,77$$

За рівнянням (7) 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

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_p} \cdot \left( \frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,1^2} \cdot \frac{2,361}{1497} \cdot \left( \frac{0,4023 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 1,2$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (57)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (58)

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

За формулою (60) розраховується площу всіх отворів, м<sup>2</sup>

$$S_0 = S \cdot f$$

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

За формулою (63) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

$$n = \frac{0,0002551}{0,000051} = 5 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,02512 \cdot 5 = 0,1256 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,1256}{0,057} = 2,2$$

$$Lg(1,2 / 2,2^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-0,09 = -0,62$$

$$\Delta = 0,53$$

За рівнянням (7) 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

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_p} \cdot \left( \frac{\mu_p}{\mu_e} \right)^{0,16}$$

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,16^2} \cdot \frac{2,361}{1497} \cdot \left( \frac{0,4023 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,47$$

Розраховується кофіцієнт  $T$  за формулою (57)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (58)

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

За формулою (60) розраховується площу всіх отворів,  $\text{м}^2$

$$S_0 = S \cdot f$$

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

За формулою (63) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

$$n = \frac{0,00040816}{0,000051} = 8 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,02512 \cdot 8 = 0,2 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,2}{0,057} = 3,525$$

$$Lg(0,47 / 3,525^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-0,6 = -0,62$$

$$\Delta = 0,02$$

За рівнянням (7) 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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,2^2} \cdot \frac{2,361}{1497} \cdot \left( \frac{0,4023 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,3$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (57)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (58)

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

За формулою (60) розраховується площу всіх отворів,  $\text{м}^2$

$$S_0 = S \cdot f$$

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

За формулою (63) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

$$n = \frac{0,0005102}{0,000051} = 10 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,02512 \cdot 10 = 0,2512 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,2512}{0,057} = 4,4$$

$$Lg(0,3/4,4^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-0,85 = -0,415$$

$$\Delta = 0,435$$

За рівнянням (7) 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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,25^2} \cdot \frac{2,361}{1497} \cdot \left( \frac{0,4023 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,192$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (57)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (58)

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

За формулою (60) розраховується 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 (63) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

$$n = \frac{0,00063775}{0,000051} = 12,755 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,02512 \cdot 12,755 = 0,32 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,32}{0,057} = 5,62$$

$$Lg(0,192/5,62^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-1,09 = -0,62$$

$$\Delta = 0,47$$

За рівнянням (7) 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

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left( \frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16}$$
$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,3^2} \cdot \frac{2,361}{1497} \cdot \left( \frac{0,4023 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,133$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (57)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (58)

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

За формулою (60) розраховується 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 (63) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

$$n = \frac{0,0007653}{0,000051} = 15 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,02512 \cdot 15 = 0,377 \text{ м}$$

$$T = \frac{0,377}{0,057} = 6,613$$

$$Lg(0,133 / 6,613^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-1,29 = -0,62$$

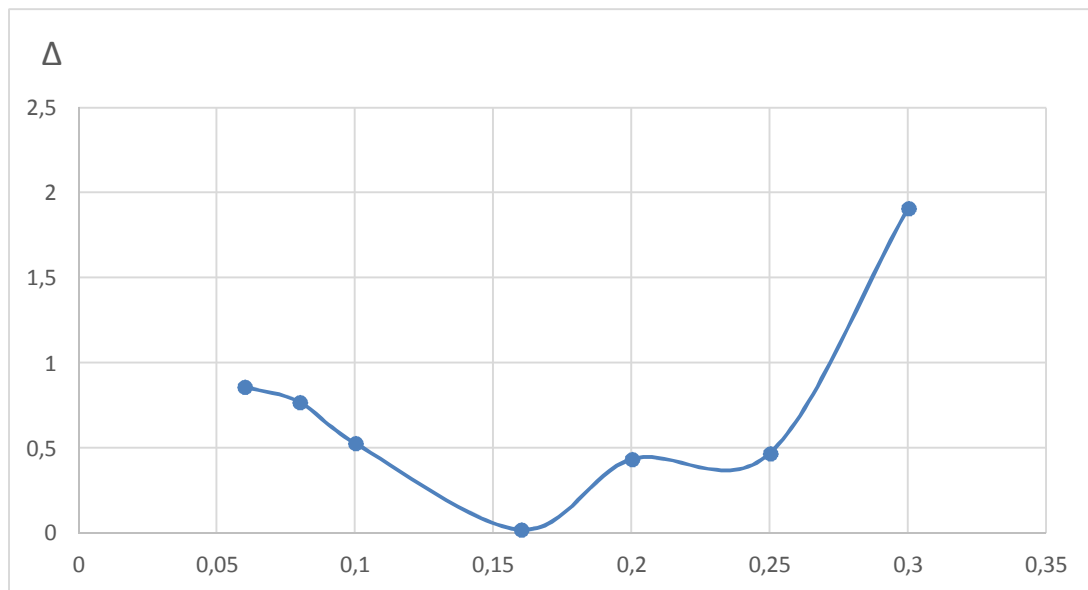
$$\Delta = 1,91$$



Таблиця №6 Залежність величин  $\Delta$  від вільного перетину  $f$

$f$	0,06	0,08	0,1	0,16	0,2	0,25	0,3
$\Delta$	0,86	0,77	0,53	0,02	0,435	0,47	1,91

Рис. №21 Графік залежності  $\Delta$  від вільного перетину  $f$



Величина  $\Delta$  є мінімальною на графіку у точці, яка відповідає вільному перетину  $f=0,16\%$ , тому для колони з діаметром  $D=0,057$  м вибираємо тарілки з вільним перетином  $f=0,16\%$ .

Висновки: проведено гідродинамічне моделювання режимів роботи дірчастих тарілок на прикладі розрахунку колони основної ректифікації утилізації пентаоксид діазоту, який вміщує йод потужністю 5 000 т/рік, при гідродинамічному моделюванні були використанні дослідні данні одержані на колонні діаметром 57 мм. на модельній системі вода - повітря.

## 12. Техніка безпеки при роботі в лабораторії

### 1. Вимоги безпеки під час виконання експериментів.

У лабораторіях кафедри устаткування хімічних підприємств  
ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ:

1.1. включати і вимикати випробувальне устаткування без дозволу викладача або інженера кафедри;

1.2. торкатися до струмопровідних частин установок, електроприводів, електропроводів і кабелів;

1.3. торкатися до рухомих частин випробувальних машин і лабораторних установок;

1.4. відгвинчувати, загвинчувати вентилі, рукоятки, маховики, сигнальні лампи, електрозапобіжники лабораторного устаткування;

1.5. збірка і розбирання установок, що знаходяться під електронапругою;

1.6. залишати працюючі (включені) установки без нагляду;

1.7. знаходитися в лабораторіях у верхньому одязі, складати верхній одяг на лабораторному устаткуванні;

1.8. захаращувати проходи між лабораторними установками особистими речами (портфелями, сумками);

1.9. знімати захищаючі кожухи деталей або електричних пускорегулюючих пристроїв, що обертаються.

1.10. у приміщеннях лабораторій забороняється приймати їжу.

2. Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1. перед початком роботи необхідно надіти спецодяг;

2.2. перевірити з'єднання електроустаткуванні з контуром захисного заземлення /занулення/, його справність, полягання інструменту, автоматичних вимикачів, розеток, вилок, освітлення, а також наявність первинних засобів пожежогасіння;

2.3. при експлуатації електроустаткування необхідно суворо керуватися правилами, висловленими в техпаспорті;

2.4. при виявленні несправностей електроустаткування, приладів, стендів, захисного заземлення негайно повідомити про це зав. кафедрою або

зав.лабораторією.

### 3. Вимоги безпеки під час виконання роботи

- 3.1. студентам дозволяється працювати тільки на справному електроустаткуванні;
- 3.2. відключення від мережі проводити, тільки узявшись за роз'єм, вилку або фішку щоб уникнути короткого замикання і можливого при цьому нещасного випадку /опіку/;
- 3.3. забороняється виймати штепсельні роз'єми, вилки, фішки, узявшись за дріт;
- 3.4. забороняється працювати на електроустаткуванні у вологому одязі, вологими руками;
- 3.5. забороняється залишати без нагляду, ремонтувати і переносити включене в мережу електроустаткування;
- 3.6. забороняється підключати декілька споживачів електричної енергії до однієї штепсельної розетки щоб уникнути перевантаження електричної мережі і виникнення загоряння;
- 3.7. забороняється заміна запобіжників, що перегоріли, "жучками". Необхідно застосовувати тільки запобіжники заводського виготовлення, що калібруються;
- 3.8. забороняється захарашувати підступи до електричних пристроїв, шафам, автоматичним вимикачам, розеткам, а також відкривати їх;
- 3.9. при раптовому припиненні подачі електроенергії всі вимикачі і важелі повинні бути негайно вимкнені;
- 3.10. не допускається залишати неізолюваними оголені дроти, перенавантажувати електромережу, користуватися розбитими вилками, розетками, вимикачами;
- 3.11. роботи по ремонту апаратури і проведення експериментів на відкритих схемах з небезпечною для життя напругою виконувати тільки удвох;
- 3.12. робоче місце тримати в сухому і чистому стані;
- 3.13. при виявленні несправностей електроустаткування,

вимірювальних приладів, стендів, за відсутності їх заземлення, а також при появі іскріння або характерного запаху перегрітої ізоляції, негайно знеструмити їх і повідомити про це керівника робіт або обслуговуючий персонал;

3.14. приступати до роботи дозволяється тільки після усунення помічених несправностей електроустаткування, вимірювальних приладів і стендів.

#### 4. Вимоги безпеки після закінчення роботи

4.1. після закінчення роботи вимкнути електроприлади, відключити відмережі лабораторні стенди;

4.2. вимкнути всі автоматичні вимикачі, відключити подовжувачі мережі 220 V, що використовуються;

4.3. один раз в квартал проводити очищення від пилу і бруду за допомогою пилососа або щітки вузлів персональних комп'ютерів;

4.4. забороняється проводити очищення від пилу і бруду включене в мережу електроустаткування;

4.5. після закінчення роботи зняти спецодяг і помістити його в спеціально відведене місце;

4.6. при відході з приміщення необхідно вимкнути всі споживачі електроенергії;

4.7. привести в порядок робоче місце;

4.8. здати ключі від лабораторії на вахту.

4.9. Про знайдені під час роботи і після закінчення роботи несправності і негаразди електроустаткування повідомити керівника занять або обслуговуючий персонал.

## Висновки

1. Проведено гідродинамічне моделювання дірчатих тарілок провального типу. Для того, щоб запобігти забрудненню навколишнього середовища, розроблено систему утилізації компонентів ракетного палива на основі концентрованих азотних кислот і оксидів азоту, що містять сполуки йоду, показано як виділити шкідливу речовину та проведено утилізацію суміші за допомогою ректифікації;

На розрахунок за рівняннями (3) – (6) меж режимів роботи тарілок провального типу значно впливає діаметр отворів, тому необхідні дослідження з метою вдосконалення методики розрахунку тарілок провального типу.

2. За допомогою рівняння (7) можна здійснювати гідродинамічне моделювання роботи тарілок провального типу.

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

4. Для моделювання швидкості в точці біфуркації необхідно в колоні діаметром  $D = 0,8$  м встановити дірчасті тарілки провального типу з вільним перерізом  $f = 0,08$ , при цьому швидкість розрахована на повний переріз колони складе  $w = 1,0$  м/с, і щільність зрошення буде  $L = 4,39$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> год).

5. Проведені в роботі дослідження підтвердили розрахункові дані. При щільності зрошення  $L = 4,39$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> год), в колоні діаметром  $D = 0,057$  м, швидкість повітря в точці біфуркації склала  $w = 1,0$  м/с. Вільний переріз тарілки становив  $f = 0,16$ .

6. Таким чином, за допомогою рівняння (2), можна здійснювати гідродинамічне моделювання газорідного шару на дірчатих тарілках провального типу великого діаметру ( $D = 0,8$  м), використовуючи експериментальні дані отримані на колоні діаметром модельного розміру ( $D = 0,057$  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 практике ректификации. - 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. Металлы и сплавы: марки и химический состав. Составитель Беккерев Игорь Васильевич, Редактор И. В. Беккерев, Корректор Д. С. Терехов, Ульяновск: УлГТУ, 2007. - с. ISBN 978-59795-0042-3  
Дополненное издание

16. 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.

17. Зелинский Ю.Г. Кафаров В.В., «Химическая промышленность», 1961, №2.
18. Касаткина А. Г., Дытнерский Ю. И. и др., «Химическая промышленность», 1958, № 3.
19. Касаткин А.Г., Дытнерский Ю. И. и др., Труды МХТИ им. Д. И. Менделеева, вып. XXXIII, 1961.
20. 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.
21. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты, «Химия», М.— Л., 1965.
22. 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.
23. 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.
24. Рузинов Л. П. Статистические методы оптимизации химических процессов – М. Химия, 1972, 200 с.
25. 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.
26. 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