

## РЕФЕРАТ

### Магістерська робота на тему

Гідродинамічне моделювання режимів роботи тарілок провального типу з розробкою колони ректифікації суміші нітратна кислота-ортофосфорна кислота потужністю 10 тис. т/рік.

Листів – 88, ілюстрацій – 17, таблиць – 9, посилань – 58.

Об'єкт дослідження: колона ректифікаційна, тарілки провального типу.

Мета роботи: визначення гідродинамічного моделювання тарілок провального типу.

Результати та їх новизна: проведено гідродинамічне моделювання тарілок провального типу на прикладі розрахунку колони основної ректифікації суміші нітратна кислота-ортофосфорна кислота. За даними розрахунку одержані наступні результати: вільний переріз для моделювання дірчатих тарілок з діаметром 1000 мм та вільного перерізу  $f=10\%$ , швидкості пари  $w=1,0$  м/с та щільності зрошування  $2,78$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>год необхідно дослідити тарілки провального типу діаметром 57 мм та вільним перерізом 16%, діаметр отворів дорівнював 12 мм. В цьому випадку співпадають для обох діаметрів швидкість газу при якій відбувається біфуркація газорідинного шару, тобто перехід від режиму рівномірного барботажу до режиму рухомого газорідинного шару на обох колонах. Ця швидкість складає 1,2 м/с при щільності зрошування  $2,78$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>год.

Рекомендації щодо використання результатів роботи: методику розрахунку рекомендують використовувати при розрахунку тарілок провального типу виробничих розмірів, при цьому треба використовувати дослідні данні одержані на експериментальних установках з колонами малого діаметру.

Висновки: проведено гідродинамічне моделювання тарілок провального типу на прикладі розрахунку колони основної ректифікації виробництва нітратна кислота-ортофосфорна кислота потужністю 10 тис. т/рік при гідродинамічному моделюванні були використанні дослідні данні одержані на колонні діаметром 57 мм на модельній системі вода-повітря.

Ключеві слова: РЕКТИФІКАЦІЯ, КОЛОНА, ГІДРАВЛІЧНИЙ ТИСК, ТАРИЛКА ПРОВАЛЬНОГО ТИПУ, ШВИДКІСТЬ ГАЗУ, ЩІЛЬНІСТЬ ЗРОШУВАННЯ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА.

## ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки .....	4
Вступ.....	5
1 Аналітичний огляд .....	6
1.1 Опис тарілки провального типу.....	6
1.2 Застосування тарілок провального типу .....	8
2 Експериментальна частина .....	11
2.1 Режими роботи тарілок провального типу.....	11
2.2 Результати досліджень меж роботи тарілок провального типу .....	15
2.3 Розрахунок режимів роботи тарілок.....	22
2.4 Теорія масштабного переходу .....	28
2.5 Опис експериментальної установки для гідравлічних і кінетичних досліджень тарілок провального типу з колоною $D = 0,057$ м.....	30
2.6 Експериментальні дані .....	32
3 Розрахунок колони .....	34
3.1 Розрахунок основних параметрів роботи колони.....	34
3.2 Визначення середніх значень параметрів по колоні, фізико-хімічних і термодинамічних констант фаз .....	35
3.3 Визначення основних геометричних параметрів колони.....	40
3.4 Матеріал колони .....	41
3.5 Розрахунок вільного перерізу тарілки провального типу $D = 1,0$ м.....	42
3.6 Розрахунок вільного перерізу тарілки провального типу $D = 0,057$ м....	50
4 Охорона праці та техніка безпеки при проведенні науково-дослідних робіт.....	59
4.1 Загальні питання з охорони праці.....	59
4.2 Аналіз стану умов праці.....	64
4.3 Виробнича санітарія .....	67
4.4 Гігієнічні вимоги до параметрів виробничого середовища .....	72
4.5 Заходи з організації виробничого середовища та попередження виникнення надзвичайних ситуацій.....	78
4.6 Техніка безпеки при проведенні науково-дослідницьких робіт .....	79
5 Висновки.....	83
Перелік джерел посилання .....	84

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

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

$F_c$  – живе перетин, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>;

$a$  – ширина щілини, м;

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

$\mu_{ж}$  – в'язкість рідини, спз;

$D$  – діаметр колони, м;

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

$\gamma_g$  і  $\gamma_p$  – питомі ваги газу (пара) і рідини, кг/м<sup>3</sup>;

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

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

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

$G_{ф}$  – 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  $\rho_n$  – 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>;

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

$\mu_{в}$  – в'язкість води при, 20°, Па·с;

$V$  – витрата пари, м<sup>3</sup>/с;

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

$S$  – площа колони, м<sup>2</sup>

$D$  – внутрішній діаметр колони, м;

$S_0$  – площа отвору, м<sup>2</sup>;

$N$  – кількість отворів, шт.

## ВСТУП

До колон належать вертикальні циліндричні апарати, виготовлені з вуглецевих, легованих і двошарових сталей, а також зі спецсплавів, призначені для масотеплообмінних процесів при переробці різних хімічних, нафтових і інших продуктів. Більшу частину цієї апаратури становлять ректифікаційні, стабілізаційні й отпарні колони, абсорбери й десорбери, постачені усередині ректифікаційними тарілками й іншими допоміжними обладнаннями у вигляді отбойників різних конструкцій, маточників для введення сировини, зрошення й штуцерів для відбору фракцій. Тарілки ректифікаційних колон розташовуються горизонтально на певній відстані одна від іншої й служать для створення контакту між парами нагрітих продуктів, що йдуть знизу-нагору, і рідиною, що стікає зверху вниз.

Типи тарілок, застосовуваних у колонних апаратах, можуть бути розділені на чотири основні групи: ковпачкові тарілки (із круглими, жолобчастими й іншими формами ковпачків, з 8-образними елементами й ін.); клапанні (баластові) тарілки із клапанами різних форм і перетинів; струйно-спрямовані тарілки різних конструкцій, наприклад, сітчасті з відбійними елементами; тарілки «провального» типу (гратчасті із прямокутними щілинами, сітчасті із круглою перфорацією полотна). Режим роботи останніх і будуть розглянуті в даній дипломній роботі.

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

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

До недоліків тарілок провального типу відносять вузький діапазон їх роботи, однак цей недолік усувається шляхом точної методики розрахунку. Рішенням цієї задачі присвячена дана робота.

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

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

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

## 1.1 Опис тарілки провального типу

До провальних ставляться тарілки ґратчасті, колосникові, трубчасті, сітчасті (плоскі або хвилясті без зливальних обладнань). Площа живого перетину тарілок змінюється в межах 15 - 30 %. Рідина й пар проходять поперемінно через кожний отвір залежно від співвідношення їх напорів. Тарілки мають малий опір, високий к.к.д., працюють при значних навантаженнях і відрізняються простотою конструкції.

Прямоточні тарілки забезпечують тривале контактування плівки рідини з пором, що рухаються зі швидкістю 14 - 45 м/с. Площа живого перетину тарілки досягає 30 %.

Сітчасті тарілки являють собою лист із пробитими в ньому круглими або щілиноподібними отворами діаметром (шириною) 3-10 мм (Рисунок 1.1). Пара, що проходить в отвори, барботирує через шар рідини, яка стікає через переливні патрубки. Швидкість пари в отворах ухвалюють 10 - 12 м/с. Різновидом сітчастих тарілок є провальні ґратчасті, у яких відсутні переливні патрубки й рідина стікає в отвори в решітці назустріч пари. Отвору в провальних тарілках трохи крупніше, чим у сітчастих.

Досить цікавою є хвиляста ґратчаста тарілка. Хвилі надають тарілці підвищену твердість, що дає можливість застосовувати її при великому діаметрі колони без опорних балок.

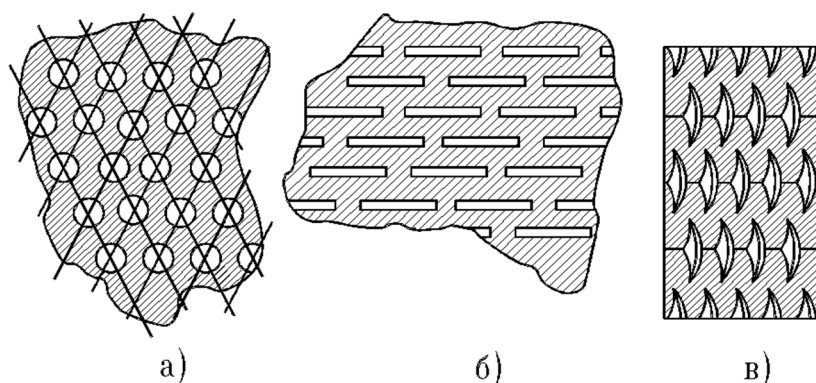


Рисунок 1.1 - Форма отворів у сітчастих тарілках.

а) круглі; б) щілиноподібні; в) просічені трикутні.

Сітчасті й ґратчасті тарілки прості по конструкції й ефективні. Недоліком їх

є необхідність точного регулювання заданого режиму (особливо по витраті газу) і чутливість до опадів і відкладанням, що забивають отвору.

На роботу тарілок великий вплив робить межтарілочата відстань. Вона визначається в першу чергу необхідністю створення умов для контакту пари і рідини, що відбувається в зонах з барботажем, піни та бризок. Ці зони розташовані послідовно над тарілкою і повинні вміщуватися між суміжними тарілками. Висота кожної зони визначається фізичними властивостями рідини, яка розділяється, конструкцією тарілки, навантаженням по пару і зазвичай знаходиться досвідченим шляхом. При роботі з рідинами, що дають рихлу піну, винесення рідини в основному відбувається за рахунок пластівців піни, що володіють високою парусністю.

Відстань між тарілками провального типу приймають рівним або трохи більше суми висот барботажного шару і сепараційного простору.

При роботі тарілок провального типу при великих діаметрах колони виникає поперечна нерівномірність, що збільшується при зменшенні швидкості пари і приводить до різкого зниження загальної ефективності контактної пристрою.

Гідродинамічний режим роботи тарілок учому залежить від співвідношення навантажень по газу і рідини та конструкції тарілок.

Нормальний режим роботи тарілки визначається правильною організацією потоків рідини і пари. За межами нормального режиму роботи тарілки знаходяться всі розглянуті режими.

Вивчення гідродинамічних режимів роботи тарілок показує, що верхні граничні навантаження колон з ґратчастими тарілками провального типу відповідають таким витратам фаз, при яких відбувається захлинання апарату внаслідок інтенсивного росту опору і висоти спіненого шару рідини на тарілках.

## 1.2 Застосування тарілок провального типу

Тарілки провального типу застосовуються для процесів газофракціювання, азеотропної перегонки.

Для збільшення продуктивності й ефективності тарілок провального типу необхідно в першу чергу забезпечити рівномірний розподіл потоків по перетину колони. Для цього пропонується передбачити гофровану поверхню тарілок, на зразок сітчастих хвилястих тарілок (рисунок 2.1 б) або тарілок із просічного листа із крайками отворів або щілин, відігнутими в одну або в різні сторони (рисунок 2.1 а). Поверхня тарілок може бути й східчастою (рисунок 2.1 в). Експериментальне визначення основних характеристик зазначених конструкцій показало, що продуктивність їх приблизно в 2 рази вище продуктивності звичайних ґратчастих тарілок при трохи кращій або однаковій ефективності поділу; такі тарілки створюють невеликий гідравлічний опір і на них утримується невеликий шар спіненої рідини.

Рівномірний розподіл потоків на протитечнім контактним обладнанні типу сітчастої тарілки пропонується здійснювати секціонуванням її на окремі гнізда із застосуванням у кожному гнізді свого переливного обладнання, що не доходить до тарілки, що лежить нижче (рисунок 2.1 г). Контакт пари й рідини на подібних обладнаннях здійснюється одночасно в барботажному шарі в підстави тарілки й у стікаючих струменях. Гідравлічний затвор забезпечується стовпом рідини, що впливає через щілини внизу переливного обладнання.

Аналогічні конструкції (рисунок 2.1 д) застосовуються також за рубіжем, головним чином у колонах для поділу вуглеводневих газів, де продуктивність лімітується рідинними навантаженнями. Експериментальні дослідження й досвід експлуатації подібних конструкцій показали їхню високу ефективність, а порівняльні розрахунки – перевага їх застосування в порівнянні зі звичайними конструкціями переливних тарілок в умовах поділу при підвищених рідинних навантаженнях.

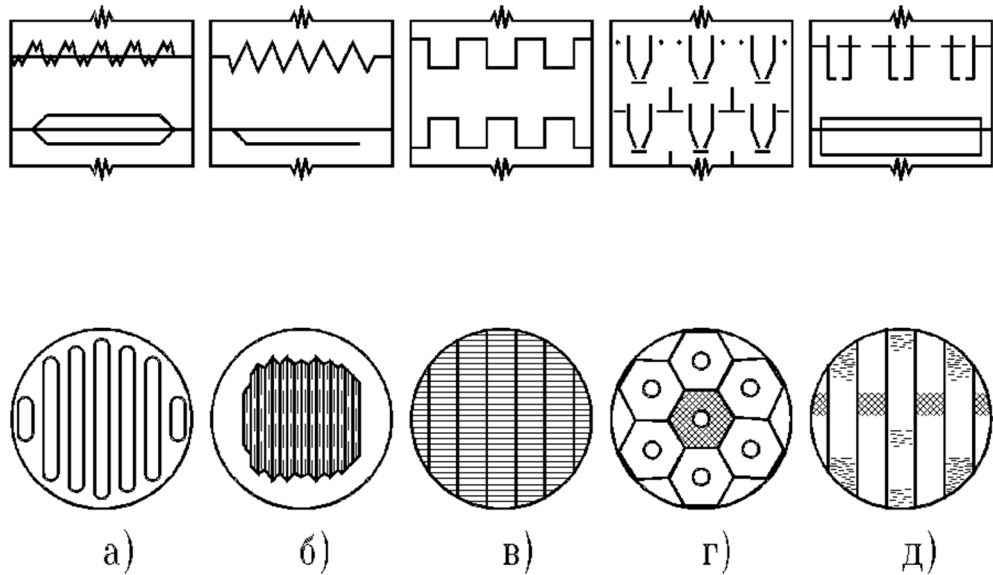


Рисунок 2.1 - Удосконалення конструкції тарілок провального типу

а) з відігнутими крайками щілин; б) з гофрованою поверхнею; в) зі східчастим розташуванням листів; г) із двома зонами контакту; д) з більшою кількістю переливів.

Для рівномірного розподілу потоків по перетину ґратчастих тарілок і, отже, для збільшення їх ефективності роблять щілини різної ширини, а розташовують їх нерівномірно по перетину колони. На тарілках із щілинами різної ширини при малих навантаженнях по газу будуть працювати головним чином вузькі щілини; у міру збільшення навантаження в роботу будуть включатися інші щілини. Очевидно, питання конструювання провальних тарілок великого діаметра з погляду рівномірного розподілу потоків по перетину колони повинні вирішуватися в результаті випробування контактної обладнання натуральної величини на спеціальних стендах на системі вода – повітря.

Значне поліпшення експлуатаційних характеристик ґратчастих і сітчастих тарілок провального типу досягається шляхом установки на більшості (70 - 80 %) щілин або отворів клапанів прямокутної або круглої форми. Випромінювання розділової здатності колон із провальними тарілками звичайної конструкції, що мають клапани, показало, що продуктивність, ефективність і діапазон їх стійкої роботи збільшуються від 20 до 50 % при невеликім збільшенні гідравлічного опору (від 20 до 40 мм вод. ст.).

Ґратчасті тарілки провального типу доцільно встановлювати в колоні разом



з перерозподільниками рідини, з розрахунку один перерозподільник через кожні 8 - 10 тарілок, при цьому чим більше діаметр колони, тем менше число тарілок повинне бути між перерозподільниками.

Високу продуктивність і низький гідравлічний опір мають також тарілки, утворені з вертикально встановлених металевих смуг невеликої висоти. Подібні конструкції успішно застосовуються у вакуумних колонах, а також при очищенні й промиванню газів.

Найбільш ефективні, надійні й у той же час прості конструкції контактних обладнань будуть створені шляхом комбінування розглянутих вище способів поліпшення конструкцій ґратчастих і сітчастих тарілок провального типу й тарілок з переливами.

## 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

### 2.1 Режими роботи тарілок провального типу

Основний вплив на ефективність тарілок будь-яких конструкцій виявляють гідродинамічні умови їх роботи. Ці умови значною мірою залежать від швидкості газу й у суттєво меншій – від щільності зрошення й фізичних властивостей фаз. Залежно від швидкості газу розрізняють три основні гідродинамічні режими роботи тарілчастих апаратів: бульбашковий, пінний і струминний (або інжекційний). Ці режими різняться структурою газорідного шару на тарілці, яка в основному визначає його гідравлічний опір, висоту й поверхню контакту на тарілці.

**Барботаажний режим.** При низьких швидкостях газу пухирці піднімаються незалежно друг від друга в близькому контакті. У міру збільшення швидкості газу вони деформуються й утворюють ніздрювату структуру. Подальше збільшення навантажень по газу приводить до турбулентного перемішування потоків. Отже, барботаажний режим відповідає таким навантаженням, коли газ розподілений у рідині (рисунок 2.1).

Середній радіус сферичного пухирця рівний

$$R = \left( \frac{R_0 \cdot \sigma}{g \cdot (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})} \right)^{0,33} \quad (2.1)$$

де  $R_0$  – радіус отвору на тарілці, м;

$\sigma$  – поверхневий натяг, Н/м;

$\rho_{\text{ж}}, \rho_{\text{г}}$  – щільності рідини й газу, кг/м<sup>3</sup>.

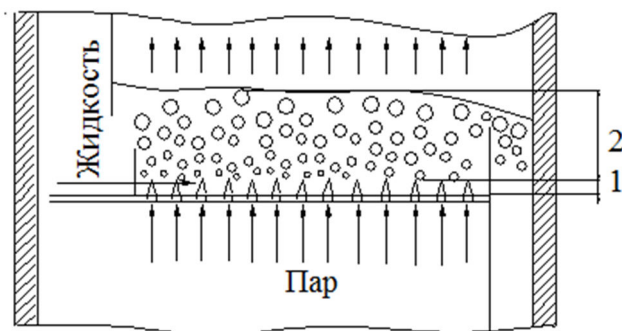


Рисунок 2.1 - Схема руху потоків на барботаажній тарілці й структура барботаажного шару: 1 – область струменів; 2 – пінний шар

Пінний режим виникає при збільшенні швидкості газу, коли його пухирці, що виходять із прорізів або отворів, зливаються в струмені, які внаслідок опору барботажного шару руйнуються (на деякій відстані від місця витікання) з утвором великої кількості дрібних пухирців. При цьому на тарілці утворюється газорідина система – *піна*, яка є нестабільною й руйнується миттєво після припинення подачі газу. Основною поверхнею контакту фаз у такій системі є поверхня пухирців, а також струменів газу й крапля рідини над газорідинною системою, які утворюються при руйнуванні пухирців газу в момент їх виходу з барботажного шару. Поверхня контакту фаз при пінному режимі найбільша, тому пінний режим звичайно є найбільш раціональним режимом роботи тарілчастих абсорберів.

Теоретичні й експериментальні дослідження показують, що значна кількість речовини (до 75–100 %) передається на невеликій відстані від входу газу в шар рідини, тобто в газових струменях. Це явище одержало назву «вхідного ефекту» або активної ділянки.

Інжекційний режим. Подальше збільшення навантажень по газу приводить до того, що безперервною фазою стає газ, а дисперсною – рідина. Структура дисперсної системи в інжекційному режимі характеризується наявністю значних газових порожнеч, рухливих агрегатів рідини із дрібними міхурами й циркуляційними струмами по висоті шару. Характерною рисою дисперсної системи в цьому режимі є також наявність інтенсивних пульсацій газозмісту й перепаду тиску в шарі. Для інжекційного режиму характерно також інтенсивне відновлення поверхні контакту фаз газових агрегатів і виняткова стійкість міхурів невеликого розміру в агрегатах рідини.

Гідродинамічні режими роботи провальних тарілок специфічні тим, що нормальна їхня робота можлива тільки після досягнення певної швидкості газу. При низьких швидкостях газу рідина на тарілці не затримується, тому що мала сила тертя на поверхні контакту рідини й газу.

При збільшенні швидкості газу настає режим роботи, який супроводжується різким збільшенням гідравлічного опору через виникнення на тарілці шару рідини. При цьому можуть виникати раніше розглянуті гідродинамічні режими. Верхньою границею швидкості є швидкість захлинання.

Для тарілчастих колон зі зливальними обладнаннями характерна *гідродинамічна нерівномірність* по довжині тарілки, яка є наслідком гідравлічного опору руху рідини по довжині тарілки. Ця нерівномірність пояснюється тим, що при русі рідини по тарілці її рівень підвищується (наприклад, через наявність ковпачків або під дією перпендикулярного потоку минаючого через рідину газу), по довжині шляху руху рідини виникає гідравлічний градієнт. Таке явище приводить до нерівномірного розподілу газу по площі тарілки: більша частина газу рухається через частину тарілки, що прилягає до зливального порога, де рівень рідини нижче, що стає особливо помітно на тарілках більших діаметрів, коли величина гідравлічного градієнта значна. Для зниження гідравлічного градієнта в апаратах великого діаметра (від 1–2 м і вище) зменшують шлях проходження рідини.

Характеристиками дисперсних або барботажних систем газ-рідина в масообмінних апаратах є: питома поверхня контакту фаз, затримка рідини, об'ємний газозміст, відносна щільність і висота дисперсної системи й середній діаметр міхура або крапля. З перерахованих характеристик перші дві - основні, що визначають масопередачу й гідродинаміку двофазних плинів.

*Питома поверхня контакту фаз* розраховується звичайно на одиниці об'єму дисперсної системи ( $a_v$ ) або на одиницю поверхні контактної обладнання ( $a_f$ ). *Затримка рідини* ( $h_{ст}$ ) - це кількість рідини, утримуване в гетерогенній системі газ-рідина. В апаратах без фіксованої поверхні контакту фаз затримка рідини визначається рівнем рідини або висотою стовпа світлої рідини. *Газозміст* являє собою відношення об'єму, зайнятого газом, до загального об'єму дисперсної системи. Щільність дисперсної системи звичайно визначається стосовно щільності чистої, неспіненої рідини. В апаратах з поверхнею контакту, утвореної в процесі взаємодії фаз, висота дисперсної системи  $H_{\Pi}$  є величиною змінною, у той час як в апаратах з фіксованою поверхнею контакту фаз вона збігається з висотою апарата. При усередненні діаметрів міхурів або крапля в дисперсних системах газ-рідина звичайно користуються середнім об'ємно-поверхневим діаметром.

Потік газу захоплює краплі рідини, а іноді й струменя рідини й несе їх з нижчележачого контактної обладнання на вищележаче.

При малоінтенсивних режимах взаємодії фаз віднесення рідини по масі полягає в основному із дрібних крапель, що витають, розміри яких при максимальній щільності ймовірності їх розподілу для систем з поверхневим натягом рідини порядку  $(5-10) \times 10^{-3}$  Н/м становлять 5–10 мкм. Зі збільшенням навантаження по газу помітно збільшується частка великих крапель у масовім віднесенні рідини й розміри їх з максимальною щільністю ймовірності розподілу для систем з поверхневим натягом рідини  $(20-40) \times 10^{-3}$  Н/м досягають уже 3–6 мм.

Кількість рідини, що захоплюється потоком газу, залежить від способу взаємодії фаз, тобто головним чином від конструкції контактної обладнання, гідродинамічного режиму руху потоків і фізичних властивостей газорідинної системи.

Через складність і недостатньої вивченості механізму захоплення рідини потоком газу навіть у найпростіших умовах взаємодії фаз, наприклад при плівковому плинні рідини або барботажу, у цей час для узагальнення досвідчених даних використовують тільки емпіричні залежності. При цьому досвідчені дані, як правило, одержують у результаті випробування різних конструкцій контактних обладнань на гідродинамічних моделях, тобто в умовах без масопередачі.

Розрізняють мінімальну й максимальну граничні навантаження по газу й рідини, що відповідають початку й припиненню стійкої й ефективної роботи контактних обладнань відповідно або різанням зміни гідродинамічних режимів руху потоків. При мінімальних граничних навантаженнях на контактних обладнаннях з переливами припиняється значний провал рідини на нижчележачу тарілку, а на провальних тарілках утворюється стійкий барботажний шар і в насадці інтенсивно накопичується рідина.

Максимальні граничні навантаження для всіх типів контактних обладнань відповідають захлинанню або надмірному міжтарільчастому віднесенню рідини. Експериментальне вивчення гідродинаміки потоків у масообмінних апаратах і узагальнення великого матеріалу по експлуатації промислових колон показують, що граничні навантаження для колон, що працюють під атмосферним або підвищеним тиском, визначаються звичайно захлинанням тарілок, а для вакуумних колон - надмірним міжтарельчастим віднесенням рідини.

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.

## 2.2 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 2.1.

Таблиця 2.1 - Геометричні параметри досліджених тарілок провального типу

№ тарілки	Діаметр колони $D$ , м	Вільний перетин	Діаметр отворів $d_0$ , м
1	2,0	16	0,012
2		25	
3		36	
4	0,4	16	
5		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 барботаажний шар. При швидкості  $w_{max}$  газорідинної шар на тарілці починав руйнуватися. В колонних діаметром  $D = 0,057$  і  $0,15$  м газорідинної 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 барботировав, а через

іншу частину тарілки газ проходив з великою швидкістю. Межа розділу газової та газорідинної фази при  $w_{\max}$ , на тарілках провального типу з малим вільним перетином, було видно досить добре.

В ході випробувань було встановлено, що діапазон стійкої роботи ( $w_{\min}$  –  $w_{\max}$ ) для тарілок провального типу встановленої в колоні з  $D = 0,057$  м суттєво (приблизно в 2 рази) менше, діапазону стійкої роботи тарілки встановленої в колоні  $D = 2$  м, при великій щільності зрошення. Значення вільних перерізів тарілок і діаметри отворів плато тарілки були близькі для колон різного діаметра.

На рисунок 2.2 і 2.4 представлена структура барботажного шару характерна для висоти барботажного шару до  $H \approx 0,1$  м.

Як видно з малюнків, барботажний шар характеризується однорідної у всіх напрямках комірчастою структурою 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 барботажних шарі сили тяжіння перевищують сили інерції рідини. Можна вважати, що барботажний шар в цьому режимі, як самоорганізована система, що знаходиться в рівновазі, так як сили гідростатичного тиску і масові сили постійні у часі у будь-якій точці барботажного шару. Вектор швидкості руху рідини має один напрямок – зверху вниз. Так як на газорідинній 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 відносно осей координат, початок яких розташовується на центральній вертикальній осі тарілки провального типу.



Рисунок 2.2 - Робота тарілки провального типу в режимі однорідного барботажного шару: тарілка № 21 (таблиця 2.1),  $L = 13,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ,  $w = 0,56 \text{ м/с}$ .

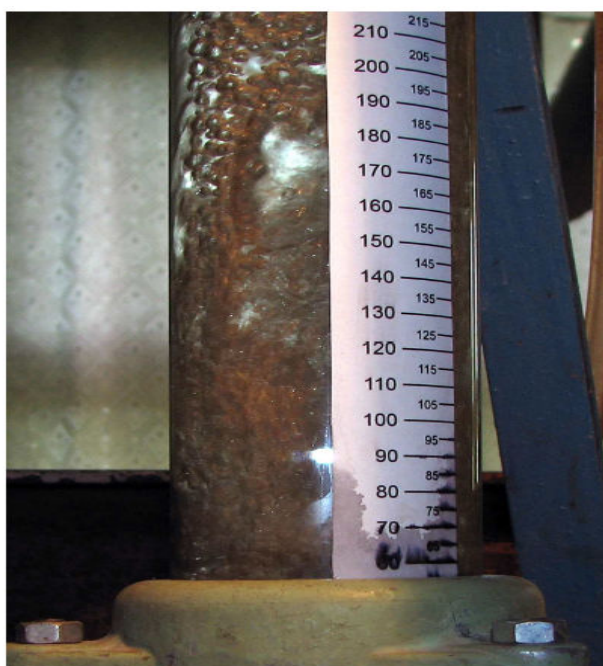


Рисунок 2.3 - Робота тарілки провального типу в режимі рухомого газорідного шару: тарілка № 21 (таблиця 2.1),  $L = 13,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ,  $w = 1,44 \text{ м/с}$ .





Рисунок 2.4 - Робота тарілки провального типу в режимі однорідного барботажного шару: тарілка № 10 (таблиця 2.1),  $L = 12,7 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ,  $w = 0,72 \text{ м/с}$ .



Рисунок 2.5 - Робота тарілки провального типу в режимі рухомого газорідинного шару: тарілка № 10 (таблиця 2.1),  $L = 12,7 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ,  $w = 0,83 \text{ м/с}$ .

При досягненні висоти газорідинного шару більшою  $H \approx 0,1 \text{ м}$  він втрачає стійкість (рисунок 2.3, 2.5). Утворюється рухливий газорідинний шар, який характеризується відсутністю структурованої комірчастою піни. Вільна поверхня газорідинного шару криволінійна. Її висота змінюється в часі для одних і тих же швидкостей газової і рідкої фаз має амплітуду і частоту. У газожидкостному шарі наблюдаються флуктуації таких параметрів як гідравлічний опір і висота

газорідинного шару, швидкостей руху рідини, які мають хаотичне напрямки. Це говорить про те, що сили інерції рідини в такому газожидкостном шарі перевищують сили тяжіння.

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

Таким чином, газорідинний шар, як самоорганізована система, втрачає стійкість і стає динамічною нерівноважною системою. Перехід від стійкої рівноважної самоорганізується ізольованої системи до нерівноважної системи називають біфуркацією [14,15].

Дослідження тарілок провального 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  $w_{min}$  з'являвся газорідинний шар, який складався з крапель і плівок рідини з високим газосодержанням. Таким чином, в газожидкостном шарі мала місце інверсія фаз, коли суцільною фазою був газ, а дисперсною фазою була рідина.

Верхня межа роботи тарілок провального типу з великим вільним перетином ( $w_{max}$ ) в колонах невеликого діаметра ( $D = 0,057; 0,15$  м), визначали по висоті вільної поверхні газорідинного шару, як і для тарілок з малим вільним перетином. У колонах діаметром  $D = 0,4$  м та  $D = 2$  м вільної поверхні газорідинного шару не було. Тому  $w_{max}$  визначали (досить умовно) по висоті підкидання найбільш великих крапель і плівок рідини.

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

Виходячи з вище сказаного, залежно мінімальної ( $w_{min}$ ) та максимальної ( $w_{max}$ ) швидкості, від швидкостей газової і рідкої фаз тарілок провального типу з великим вільним перетином можна сказати, що їх діапазон стійкої роботи ( $w_{min} - w_{max}$ ) практично такий же, як у тарілок провального типу з малим вільним перетином, встановлених в колонах великого діаметру ( $D = 2$  м). Однак його значення зрушені в бік великих швидкостей газу в перерізі колони при однаковій

щільності зрошення рідини. Діапазон стійкої роботи ( $w_{min} - w_{max}$ ) у тарілок провального типу з великим вільним перетином менше залежить від діаметра колони, ніж у тарілок провального типу з малим вільним перетином.

У всіх представлених тарілок провального типу діаметр отворів плато тарілки становив  $d_0 = 0,012$  м (крім тарілки № 10, Таблиця 2.1, де  $d_0 = 0,008$  м).

Після аналізу поданих експериментальних даних можна зробити висновок, що нижній і верхній межі роботи ( $w_{min}$  і  $w_{max}$ ) тарілок провального типу з однаковим діаметром отворів, істотно залежать від вільного перетину тарілок для одних і тих же співвідношень навантажень по газовій і рідкій фазі. В той час, як нижня межа роботи ( $w_{min}$ ) тарілок провального типу, практично 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 фазі.

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

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

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 здійснюється стрибкоподібно, тобто при незначній зміні керуючого параметра (швидкості газу в перерізі колони) відбувається стрибкоподібна зміна обумовленого параметра (гідралічного опору тарілок провального типу).

Після вивчення меж роботи тарілок провального типу можна зробити наступні висновки:

– діапазон стійкої роботи тарілок провального типу залежить від їх геометричних характеристик, таких як вільне перетин тарілки, їх діаметра.

– в межах сталої роботи тарілок провального типу від мінімальної швидкості ( $w_{\min}$ ), при якій на тарілці з'являється стійкий барботажний шар, до максимальної швидкості газу в перерізі колони ( $w_{\max}$ ), при якій відбувається руйнування газорідного шару, існують три режими роботи тарілки провального типу (режим однорідного барботажного шару; режим рухомого газорідного шару і режим руйнування газорідного шару).

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

– перехід від режиму однорідного барботажного шару до режиму рухомого газорідного шару відбувається при висоті газорідного шару  $H \approx 0,1$  м для всіх досліджених тарілок (таблиця 2.1) і всіх співвідношень витрат газової і рідкої фази в точці біфуркації.

### 2.3 Розрахунок режимів роботи тарілок

Критична точка переходу до хвильового режиму від режиму емульгування (рисунок 2.6), тобто точку Е, за посібником Ю. Р. Зелінського [16] пропонується знаходити по рівнянню:

$$\left[ \left( \frac{\omega^2}{gF_c^2 a} \cdot \frac{\gamma_r}{\gamma_{ж}} \cdot \mu_{ж}^{0,16} \right) = 0,04 \frac{D}{a} - 1,75 \left( \frac{L}{G} \right)^{1/4} \cdot \left( \frac{\gamma_r}{\gamma_{ж}} \right)^{1/8} \right] \quad (2.2)$$

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

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

$F_c$  – 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>с

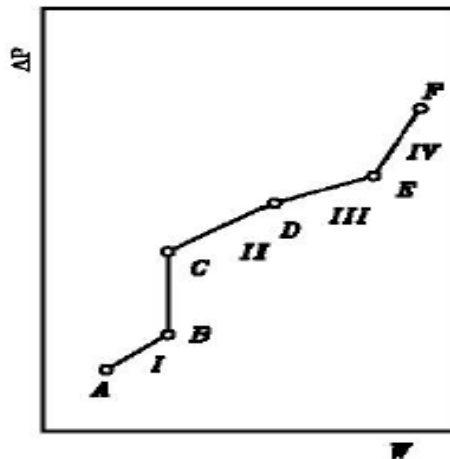


Рисунок 2.6 Графік залежності опору тарілок провального типу від швидкості пари: I – IV – гідродинамічні режими роботи. Точки В, С, D, Е уявляють собою моменти переходу від одного режиму до іншого. Точка Е визначає максимально допустиму швидкість пара в колоні.

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

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

$$\left[ \left( \frac{\omega^2}{gF_c^2 a} \cdot \frac{\gamma_r}{\gamma_{ж}} \cdot \mu_{ж}^{0,16} \right) = 1 - 2,45 \left( \frac{L}{G} \right)^{1/4} \cdot \left( \frac{\gamma_r}{\gamma_{ж}} \right)^{1/8} \right] \quad (2.3)$$

Останній метод базується на кореляції двох комплексних величин  $X$  і  $Y$ . 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. 2.7), який є аналогічним раніше запропонованому для визначення граничних швидкостей у колонах з масообмінними насадками.

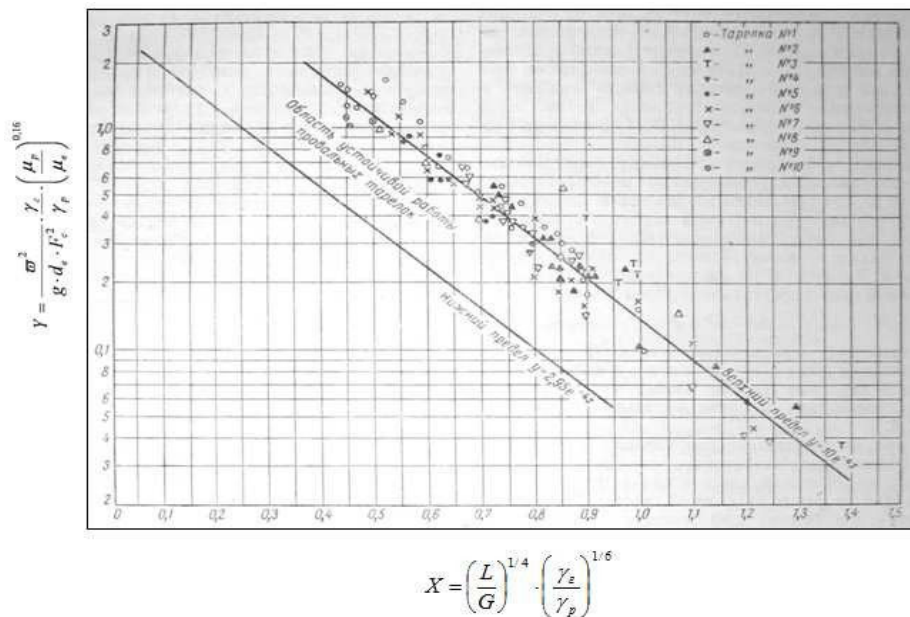


Рисунок 2.7 – Залежність відношення вагових швидкостей потоків від граничної швидкості газу (пара) (швидкості захлинання) у колонах з тарілками провального типу, їхні фізичні властивості і визначальні розміри тарілок ( $D_k = 0,075$  і  $0,240$  м,  $f = 0,13 - 0,4$ ).

По осі абсцис нанесено комплекс

$$X = \left( \frac{G_p}{G_n} \right)^{1/4} \cdot \left( \frac{\rho_g}{\rho_p} \right)^{1/8} \quad (2.4)$$

а по осі ординат комплекс

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_p} \cdot \left( \frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^{0,16} \quad (2.5)$$

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

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

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

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

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

$\mu_p$  – густина рідини,  $\text{сп}$ ;

$\mu_v$  – густина води при  $20^\circ$ ,  $\text{сп}$ .

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:

$$Y = 10 \cdot e^{-4x} \quad (2.6)$$

де  $e$  – основа натуральних логарифмів.

Отже, за рівнянням (2.6) можна визначити граничну швидкість газу (пари), але робоча швидкість має бути вибрана декілька більш нижчою за розраховану за рівнянням (2.6), 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 (рисунок 2.7). Ця пряма має однаковий нахил із прямою верхньої межі роботи (захлинання) тарілок і відповідає рівнянню

$$Y = 2,95 \cdot e^{-4x} \quad (2.7)$$

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  $L = 4 - 150 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{год}$ , швидкість газу в перерізі колони досягала  $w = 4 \text{ м/с}$ . Було також проведено гідравлічні та кінетичні дослідження тарілок провального типу на стенді з колоною  $D = 0,3 \text{ м}$  при ректифікації системи нітролеум-йод. На стенді з колоною  $D = 0,15 \text{ м}$  досліджували масообмін при десорбції двоокису вуглецю з води азотом. На стенді з колоною  $D = 0,057 \text{ м}$  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  $H = 0,08 - 0,1 \text{ мм}$  починається режим рухомого барботажного шару, який характерний відсутністю структурованої чарункуватої піни 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  $H = 0,08 - 0,1 \text{ мм}$ , при цьому 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 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 рідинна 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.

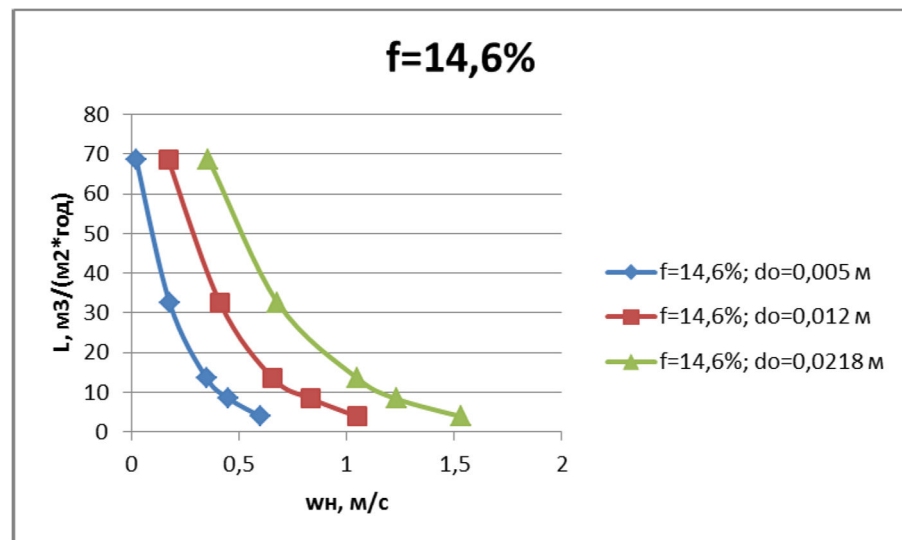


Рисунок 2.8 Залежність  $w_H = f(L)$  для тарілок провального типу з вільним перерізом  $f = 14,6\%$  і різним діаметром отворів.

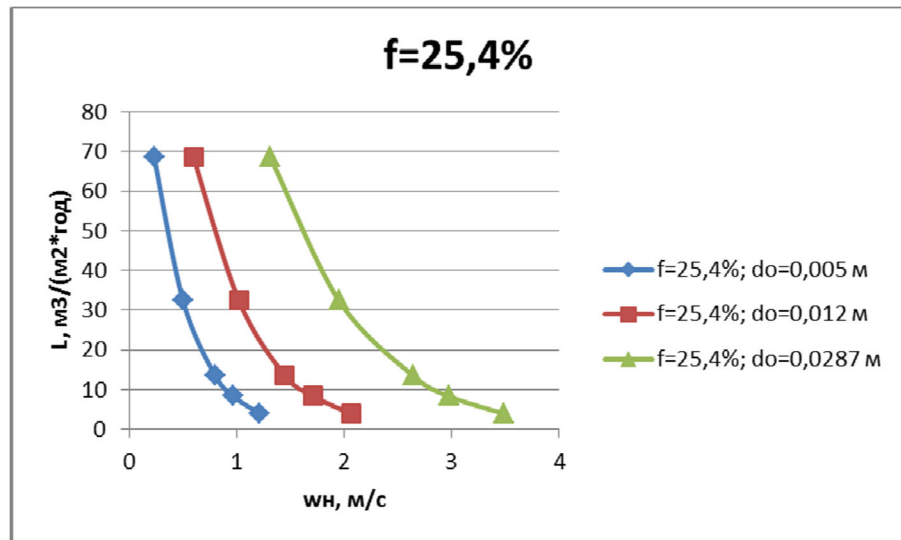


Рисунок 2.9 Залежність  $w_n = f(L)$  для тарілок провального типу з вільним перерізом  $f = 25,4\%$  і різним діаметром отворів.

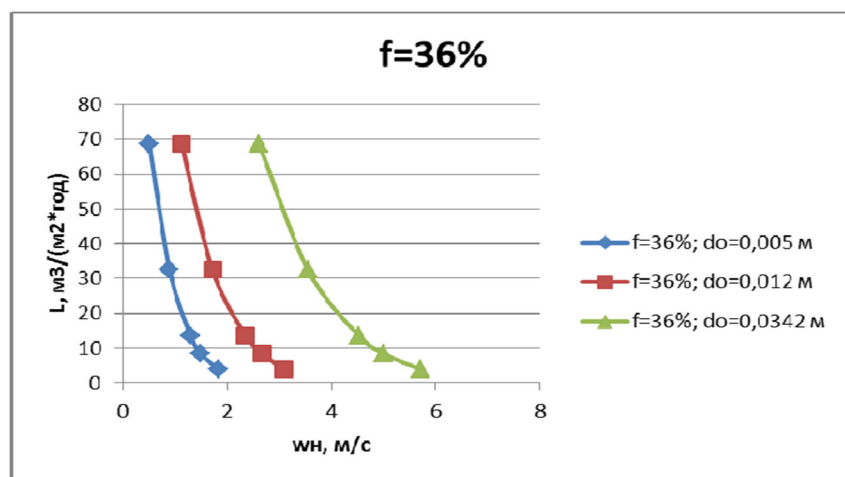


Рисунок 2.10 Залежність  $w_n = f(L)$  для тарілок провального типу з вільним перерізом  $f = 36\%$  і різним діаметром отворів

Нижнею межею 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,  $\text{м/с}$ .

З отриманих графіків, авторами зроблено такі висновки:

Існуючі у літературних джерелах рівняння для розрахунку діапазону стійкої роботи тарілок провального типу не можуть бути застосовані для тарілок діаметром  $D = 0,057$  м.

Нижня межа роботи тарілок провального типу суттєво залежить від діаметра отворів в плато тарілки для одного і того самого вільного перерізу.

Для розрахунку  $w_n = f(L)$  можна використовувати рівняння з середньою відносною похибкою  $A = 9\%$ , яка є нормальною.

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.

## 2.4 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 переміщення 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 (2.8).

$$\lg\left(\frac{Y}{T^{0,5}}\right) = 0,0751 - 1,68 \cdot X \quad (2.8)$$

У рівняння (2.8) входить коефіцієнт Т, який є відношенням суми периметрів усіх отворів плато тарілки до її діаметру [6]. Отже параметр Т 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 гідродинамічного моделювання тарілок провального типу з різними геометричними характеристиками [8].

2.5 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.

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

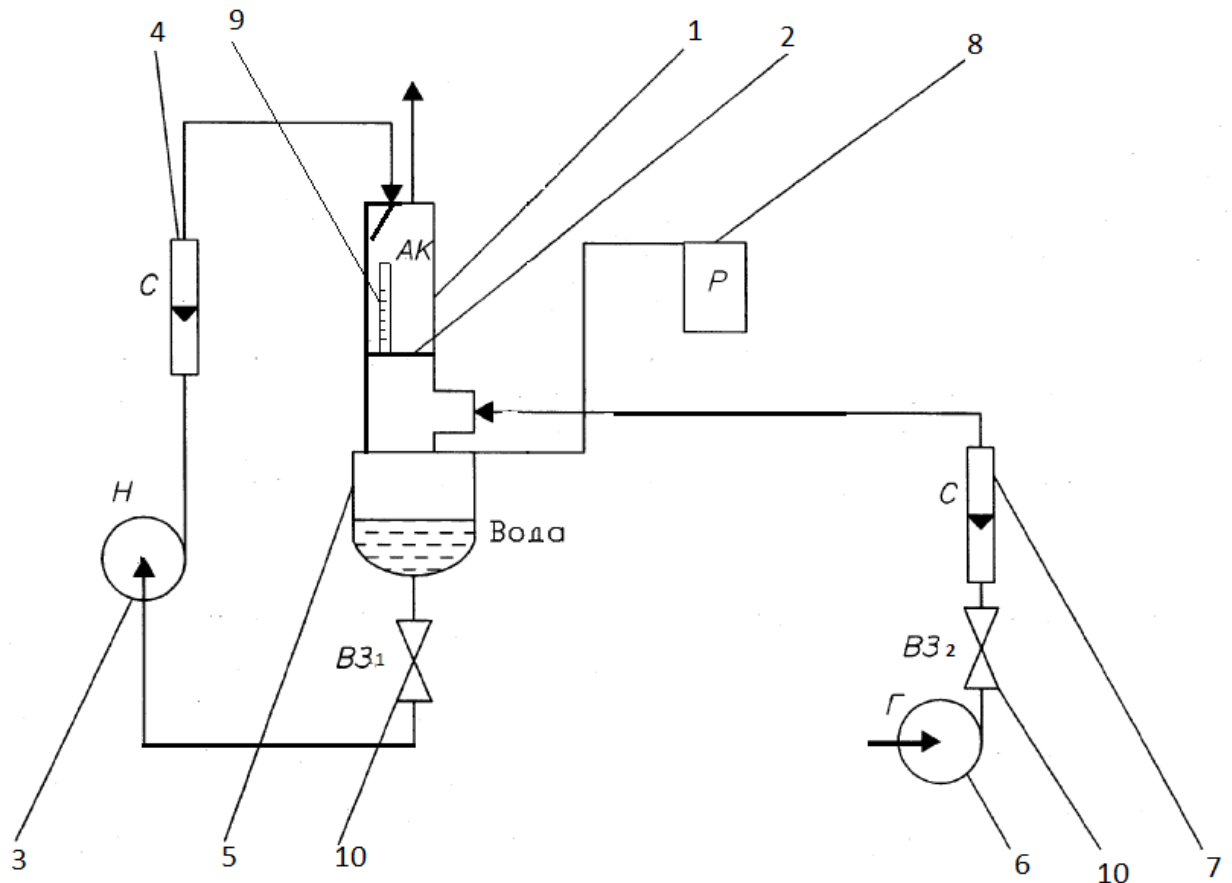


Рисунок 2.11 - Схема експериментальної установки для гідравлічних та кінетичних досліджень тарілок провального типу з колоною  $D = 0,057$  м: 1 – колона; 2 – тарілка; 3 – насос; 4 – ротаметр; 5 – куб колони; 6 – газодувки; 7 – ротаметр; 8 – манометр; 9 – лінійка; 10 – вентилі.

### 2.5.2 Схема лабораторної установки

Установка являє собою колону 1, з установленою в ній дірчатою тарілкою провального типу 2. За допомогою насоса 3 вода подається через вентиль  $B3_1$  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  $B3_2$  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.

### 2.5.3 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 тарілці: від режиму рівномірного барботажу 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.

### 2.5.4 Пуск колони

Подається напруга в мережі, після чого включається насос 1, відкривається кульовий кран 9, встановлюються 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

### 2.5.5 Зупинка колони

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

### 2.6 Експериментальні дані

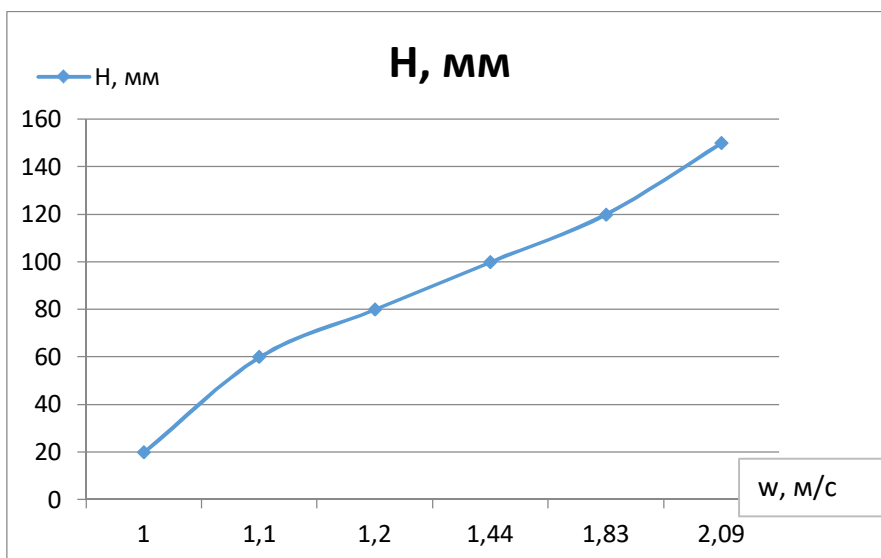


Рисунок 2.12 - Залежність висоти газорідного шару від швидкості пари

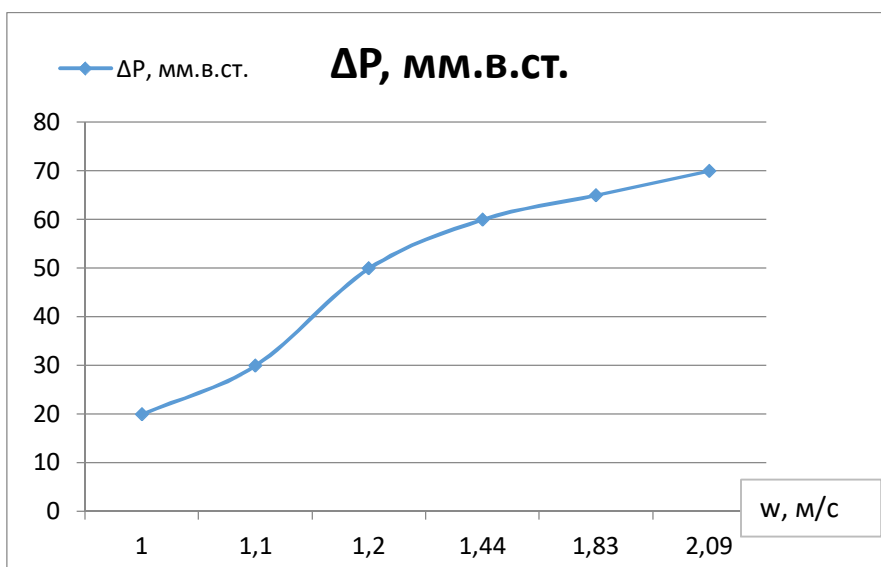


Рисунок 2.13 - Залежність гідравлічного опору газорідного шару від швидкості пари

Були проведені дослідження 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 90 мм швидкість газу дорівнює 1,2 м/с. Розрахунком було встановлено що точка біфуркації в промисловій колоні досягається при швидкості пари 1,2 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: 55 мм в. ст. На основі гідравлічного моделювання допускаємо, що гідравлічний опір тарілки провального типу в промисловій колоні в режимі рухомого барботажного шару буде складати 55 мм в. ст.



## 3 РОЗРАХУНОК КОЛОНИ

### 3.1 Розрахунок основних параметрів роботи колони

У ректифікаційній колоні з тарілками провального типу передбачається поділ суміші нітратна кислота-ортофосфорна кислота при надлишковому тиску 10000 мм вод. ст.

Характеристика нітратної кислоти (низькокиплячий компонент):

$M_a = 63$  г/моль – молекулярна маса;

$T_a = +82,6$  °С – температура кипіння;

$\rho_a = 1513$  кг/м<sup>3</sup> – густина нітратної кислоти при 20 °С.

Характеристика ортофосфорної кислоти (висококиплячий компонент):

$M_b = 98$  г/моль – молекулярна маса;

$T_b = +158$  °С – температура кипіння;

$\rho_b = 1658$  кг/м<sup>3</sup> – густина ортофосфорної кислоти при 20°С.

Кількість одержуваного дистиляту, кг/с:

$$G_p = \frac{G}{T \cdot 24 \cdot 3600} \quad (3.1)$$

де  $G = 10\,000\,000$  кг/рік - необхідна продуктивність колони по нітролеуму;

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

$$G_p = \frac{10000000}{335 \cdot 24 \cdot 3600} = 0,3455 \text{ кг/с} = 1244 \text{ кг/год}$$

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

$$G_f = G_p + G_w \quad (3.2)$$

$$G_f a_f = G_p a_p + G_w a_w \quad (3.3)$$

Кількість вихідної суміші

$$G_f = \frac{G_p (a_p - a_w)}{a_f - a_w} \quad (3.4)$$

$a_f = 83,7\%$  – масовий склад вихідної суміші;

$a_p = 99,95\%$  – масовий склад дистиляту;

$a_w = 0,221\%$  – масовий склад кубового залишку.

$$G_f = \frac{0,3455 \cdot (0,9995 - 0,00221)}{0,837 - 0,00221} = 0,4128 \text{ кг/с}$$

Кількість кубового залишку

$$G_w = G_f - G_p \quad (3.5)$$

$$G_w = 0,4128 - 0,3455 = 0,0673 \text{ кг/с}$$

Перевірка матеріального балансу за рівнянням

$$G_f a_f = G_p a_p + G_w a_w \quad (3.6)$$

$$0,4128 \cdot 0,837 = 0,3455 \cdot 0,9995 + 0,0673 \cdot 0,00221$$

$$0,3455 = 0,3455$$

Умова виконується.

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

Перераховуємо масові концентрації в мольні.

Мольна концентрація

$$X = \frac{\frac{a}{M_a}}{\frac{a}{M_a} + \frac{1-a}{M_b}} \quad (3.7)$$

Мольна концентрація вихідної суміші

$$X_F = \frac{\frac{0,837}{63}}{\frac{0,837}{63} + \frac{1-0,837}{98}} = 0,889 \text{ мол.}$$

Мольна концентрація дистилляту

$$\chi_P = \frac{\frac{0,9995}{63}}{\frac{0,9995}{63} + \frac{1-0,9995}{98}} = 0,9997 \text{ мол.}$$

Мольна концентрація кубового залишку

$$\chi_W = \frac{\frac{0,00221}{63}}{\frac{0,00221}{63} + \frac{1-0,00221}{98}} = 0,0034 \text{ мол.}$$

По рідкій фазі

Середня мольна концентрація в нижній частині колони

$$X_{cp^H} = \frac{X_W + X_F}{2} \quad (3.8)$$

$$X_{cp^H} = \frac{0,0034 + 0,889}{2} = 0,446$$

Середня мольна концентрація у верхній частині колони

$$X_{cp^B} = \frac{X_F + X_P}{2} \quad (3.9)$$

$$X_{cp^B} = \frac{0,889 + 0,9997}{2} = 0,944$$

Середня мольна концентрація по колоні

$$X_{cp} = \frac{X_{cp^H} + X_{cp^B}}{2} \quad (3.10)$$

$$X_{cp} = \frac{0,446 + 0,944}{2} = 0,695$$

Середня масова концентрація по колоні

$$a_{cp} = \frac{X_{cp} \cdot M_A}{X_{cp} \cdot M_A + (1 - X_{cp}) \cdot M_B} \quad (3.11)$$

$$a_{cp} = \frac{0,695 \cdot 63}{0,695 \cdot 63 + (1 - 0,695) \cdot 98} = 0,59$$

Для визначення значень  $t_{XW}$ ,  $t_{XF}$ ,  $t_{XP}$  будується діаграма рівноважного складу рідини (X) і пари (Y) в мол.% і температури кипіння суміші при 10000 Па (абс.).

Таблиця 3.1 – Залежність складу суміші 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,  $^{\circ}\text{C}$

при  $X_F = 0,889$   $t_{XF} = 18^{\circ}\text{C}$

Температура виходу дистилляту,  $^{\circ}\text{C}$

при  $X_P = 0,9997$   $t_{XP} = 22^{\circ}\text{C}$

Температура виходу кубового залишку,  $^{\circ}\text{C}$

при  $X_W = 0,0034$   $t_{XW} = 30^{\circ}\text{C}$

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

$$t_{Xcp}^H = \frac{t_{XW} + t_{XF}}{2} \quad (3.12)$$

$$t_{Xcp}^H = \frac{30 + 18}{2} = 24^{\circ}\text{C}$$

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

$$t_{Xcp}^B = \frac{t_{XF} + t_{XP}}{2} \quad (3.13)$$

$$t_{Xcp}^B = \frac{18 + 22}{2} = 20^{\circ}\text{C}$$

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

$$t_{Xcp} = \frac{t_{Xcp}^H + t_{Xcp}^B}{2} \quad (3.14)$$

$$t_{Xcp} = \frac{24 + 20}{2} = 22^{\circ}\text{C}$$

Середня молекулярна маса

$$M_{Xcp} = M_a \cdot X_{cp} + M_{\epsilon} \cdot (1 - X_{cp}) \quad (3.14)$$

$$M_{Xcp} = 63 \cdot 0,695 + 98 \cdot (1 - 0,695) = 73,675$$

Середня густина,  $\text{кг}/\text{м}^3$

$$\rho_{Xcp} = \frac{\rho_a \cdot \rho_{\epsilon}}{\rho_{\epsilon} \cdot a_{cp} + \rho_a \cdot (1 - a_{cp})} \quad (3.15)$$

$\rho_a = 1513 \text{ кг}/\text{м}^3$  – густина концентрованої нітратної кислоти і, при  $t_{Xcp} = 22^{\circ}\text{C}$ ;

$\rho_b = 1685 \text{ кг}/\text{м}^3$  – густина ортофосфорної кислоти, при  $t_{Xcp} = 22^{\circ}\text{C}$

$$\rho_{Xcp} = \frac{1513 \cdot 1685}{1685 \cdot 0,59 + 1513 \cdot (1 - 0,59)} = 1579 \text{ кг}/\text{м}^3$$

Середня в'язкість

$$\lg \mu_{xcp} = X_{cp} \cdot \lg \mu_a + (1 - X_{cp}) \cdot \lg \mu_b \quad (3.16)$$

де  $\mu_a = 0,39$  спз – в'язкість низькокиплячого компонента при середній температурі  $t_{xcp} = 22^{\circ}\text{C}$ ;

$\mu_b = 0,5$  спз – в'язкість висококиплячого компонента при середній температурі  $t_{xcp} = 22^{\circ}\text{C}$  [14]

$$\text{Lg}\mu_{xcp} = 0,695 \cdot \text{Lg}0,39 + (1 - 0,695) \cdot \text{Lg}0,5 = -0,376$$

$$\mu_{xcp} = 0,42 \text{ спз} = 0,42 \text{ мПас} = 0,42 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$$

Середня поверхня натягу

$$\sigma_{cp} = \sigma_a \cdot X_{cp} + \sigma_b \cdot (1 - X_{cp}) \quad (3.17)$$

де  $\sigma_a = 1,46$  дин/см – поверхневий натяг низькокиплячого компоненту при температурі  $t_{xcp} = 22^{\circ}\text{C}$ ;

$\sigma_b = 18$  дин/см - поверхневий натяг висококиплячого компоненту при температурі  $t_{xcp} = 22^{\circ}\text{C}$

$$\sigma_{cp} = 1,46 \cdot 0,695 + 18 \cdot (1 - 0,695) = 6,5 \text{ дин/см} = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$$

*По газовій фазі*

Середня мольна концентрація в нижній частині колони, мол.

$$Y_{cp}^H = \frac{Y_W + Y_F}{2} \quad (3.18)$$

$$Y_{cp}^H = \frac{0,0034 + 0,964}{2} = 0,4837 \text{ мол.}$$

Середня мольна концентрація у верхній частині колони, мол.

$$Y_{cp}^B = \frac{Y_F + Y_P}{2} \quad (3.19)$$

$$Y_{cp}^B = \frac{0,964 + 0,9997}{2} = 0,98185, \text{ мол.}$$

Середня мольна концентрація по колоні, мол.

$$Y_{cp} = \frac{Y_{cp}^H + Y_{cp}^B}{2} \quad (3.20)$$

$$Y_{cp} = \frac{0,4837 + 0,98185}{2} = 0,73 \text{ мол.}$$

Температура подачі вихідної суміші, при

$$Y_F = 0,964 \quad t_{YF} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

Температура виходу дистиляту:

$$Y_P = 0,9997 \quad t_{YP} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

Температура подачі кубового залишку:

$$Y_W = 0,0034 \quad t_{YW} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

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

$$t_{Ycp}^H = \frac{t_{YW} + t_{YF}}{2} \quad (3.21)$$

$$t_{Ycp}^H = \frac{30 + 18}{2} = 24, \text{ }^{\circ}\text{C}$$

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

$$t_{Ycp}^B = \frac{t_{YF} + t_{YP}}{2} \quad (3.22)$$

$$t_{Ycp}^B = \frac{18 + 22}{2} = 20, \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Середня температура по колоні

$$t_{Ycp} = \frac{t_{Ycp}^H + t_{Ycp}^B}{2} \quad (3.23)$$

$$t_{Ycp} = \frac{24 + 20}{2} = 22, \text{ }^{\circ}\text{C}$$

*Середня молекулярна маса*

$$M_{Ycp} = M_a \cdot Y_{cp} + M_e \cdot (1 - Y_{cp}) \quad (3.24)$$

$$M_{Ycp} = 63 \cdot 0,73 + 98 \cdot (1 - 0,73) = 72,45$$

Середня густина,  $\text{кг}/\text{м}^3$

$$\rho_{Ycp} = \frac{M_{Ycp} \cdot p \cdot T_o}{22,4 \cdot p_o \cdot T} \quad (3.25)$$

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

$T_o = 273 \text{ }^{\circ}\text{K}$  – точка плавлення льоду;

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

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

$$T = t_{Ycp} + T_o \quad (3.26)$$

$$T = 22 + 273 = 293^{\circ} K$$

$$\rho_{Ycp} = \frac{72,45 \cdot 4,1 \cdot 273}{22,4 \cdot 1 \cdot 293} = 2,361 \text{ кг/м}^3$$

### 3.3 Визначення основних геометричних параметрів колони

Діаметр колони

$$D_K = \sqrt{\frac{V_Y}{0,785 \cdot \omega_Y}} \quad (3.27)$$

де  $V_Y$  – об'ємна витрата пари,  $\text{м}^3/\text{с}$

$\omega_Y$  – швидкість пари, віднесена до повного перерізу колони,  $\text{м/с}$

$$V_Y = \frac{G_Y}{\rho_{Ycp}} \quad (3.28)$$

де  $G_Y$  – кількість пари, що піднімається по колоні,  $\text{кг/с}$

$$G_Y = G_P (R_{om} + 1) \quad (3.29)$$

$$G_Y = 0,3455 \cdot (4 + 1) = 1,73 \text{ кг/с}$$

$$V_{Ycp} = \frac{1,73}{2,361} = 0,73 \text{ м}^3/\text{с}$$

Рекомендована швидкість пари у колонні

$$w = 1,0 \text{ м/с}$$

$$0,785 \cdot D^2 = \frac{V}{w} \quad (3.30)$$

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}} \quad (3.31)$$

$$D = \sqrt{\frac{0,73}{0,785 \cdot 1}} = 0,96 \text{ м}$$

Приймаємо діаметр колони  $D = 1,0$  м, тоді швидкість пари, що розраховується на повний переріз колони, буде складати

$$w = \frac{V}{0,785 \cdot D^2} \quad (3.32)$$

$$w = \frac{0,73}{0,785 \cdot 1^2} = 0,93 \text{ м/с}$$

Приймаємо  $w = 1,0$  м/с

### 3.4 Матеріал колони

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

Сталь 02Х8Н22С6 корозійностійка жароміцна аустенітного класу.

Сталь 02Х8Н22С6 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 02Х8Н22С6.

02Х8Н22С6 має у складі: C=0,02%, Cr=8%, Ni=22%, Si=6%.

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.



### 3.5 Розрахунок вільного перерізу тарілки провального типу $D = 1,0$ м

Визначаємо вільний переріз тарілок провального типу в колонні  $D = 1,0$  м

Розрахунок проводиться за формулою

$$\lg\left(\frac{Y}{T^{0.5}}\right) = 0,0751 - 1,68 \cdot X \quad (3.33)$$

$$X = \left(\frac{G_p}{G_n}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_p}\right)^{1/8} \quad (3.34)$$

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot f^2} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_s}\right)^{0.16} \quad (3.35)$$

Розрахунок кількості кубового залишку

$$G_w = G_f - G_p \quad (3.36)$$

$$G_w = 0,4128 - 0,3455 = 0,0673 \text{ кг/с}$$

$$V = 0,73 \text{ м}^3/\text{с}$$

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

$$L = G_p / S \quad (3.37)$$

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

$$L = 1244 / 0,785 = 1584 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ год})$$

Розраховується кількість флегми

$$R = (F - G_p) \quad (3.38)$$

$$R \cdot G_p = F - G_p \quad (3.39)$$

$$R \cdot G_p + G_p = G_\phi \quad (3.40)$$

$$4 \cdot 0,3455 + 0,3455 = 4,837 \text{ кг/с}$$

Кількість флегми,  $\text{кг/год}$ ;

$$G_\phi = 4,837 \text{ кг/с} = 17413 \text{ кг/год}$$

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

$$G_n = G_\phi + G_f \quad (3.41)$$

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

$$G_f = 0,4128 \text{ кг/с}$$

$$G_n = 4,837 + 0,412 = 5,249 \text{ кг/с} = 18896 \text{ кг/год}$$

Розраховуємо вагові швидкості рідини, кг/год;

$$G_{\text{рід}} = (G_{\text{ф}} + G_{\text{н}}) / 2 \quad (3.42)$$

$$G_{\text{рід}} = (17413 + 18896) / 2 = 18155 \text{ кг} / \text{год}$$

Визначаються розрахункові параметри

За рівнянням (3.33) розраховується перша інтеграція при  $f = 0,06\%$

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

де  $Y$  розраховується за формулою (3.35)

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

де  $w$  – рекомендована швидкість пари у колоні

$$w = 1,0 \text{ м/с}$$

$\rho_p$  – питома вага рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$$\rho_p = 1579 \text{ кг/м}^3;$$

$\rho_z$  – питома вага газу (пара), кг/м<sup>3</sup>;

$$\rho_z = 2,361 \text{ кг/м}^3;$$

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

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2;$$

$d_0$  – діаметр отворів в тарілці, м;

$$d_0 = 0,012 \text{ м}$$

$\mu_p$  – в'язкість рідини, Па·с;

$$\mu_p = 0,42 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,06^2} \cdot \frac{2,361}{1579} \cdot \left( \frac{0,42 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 4,8$$

$T$  – коефіцієнт, який розраховується за формулою

$$T = \frac{\sum \Pi}{D} \quad (3.43)$$

де  $\sum \Pi$  – сумарний периметр отворів

$$\sum \Pi = \Pi \cdot n \quad (3.44)$$

де  $\Pi$  – периметр отворів, м

$$\Pi = \pi \cdot d_0 \quad (3.45)$$

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

Розраховується площу всіх отворів

$$S_0 = S \cdot f \quad (3.46)$$

де –  $S$  площа колони, м<sup>2</sup>

$$S = 0,785 \cdot D^2 \quad (3.47)$$

$$S = 0,785 D^2 = 0,785 \cdot 1^2 = 0,785 \text{ м}^2$$

$$S_0 = 0,785 \cdot 0,06 = 0,047 \text{ м}^2$$

Розраховується площу одного отвору

$$S'_0 = \pi \cdot R^2 \quad (3.48)$$

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

Розраховується кількість отворів на тарілці

$$n = \frac{S_0}{S'_0} \quad (3.49)$$

$$n = \frac{0,047}{0,00011} = 429 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,038 \cdot 429 = 16,3 \text{ м}$$

$$T = \frac{16,3}{1} = 16,3$$

За рівнянням (3.34) розраховується  $X$

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

$$X = \left( \frac{17413}{18896} \right)^{1/4} \cdot \left( \frac{2,361}{1579} \right)^{1/8} = 0,415$$

$$Lg(4,8 / 16,3^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$0,08 = -0,622$$

$$\Delta = 0,54$$

За рівнянням (3.33) розраховується друга інтеграція при  $f = 0,08\%$

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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,08^2} \cdot \frac{2,361}{1579} \cdot \left( \frac{0,42 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 2,66$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (3.43)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (3.44)

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

За формулою (3.46) розраховується площу всіх отворів

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 0,785 \cdot 0,08 = 0,063 \text{ м}^2$$

За формулою (3.49) розраховується кількість отворів на тарілці

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

$$n = \frac{S_0}{S'_0} = \frac{0,063}{0,00011} = 571 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,038 \cdot 571 = 21,7 \text{ м}$$

$$T = \frac{21,7}{1} = 21,7$$

$$Lg(2,66 / 21,7^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-0,24 = -0,622$$

$$\Delta = 0,38$$

За рівнянням (3.33) розраховується третя інтеграція при  $f = 0,1\%$

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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,1^2} \cdot \frac{2,361}{1579} \cdot \left( \frac{0,42 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 1,7$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (3.43)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (3.44)

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

За формулою (3.46) розраховується площу всіх отворів

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 0,785 \cdot 0,1 = 0,0785 \text{ м}^2$$

За формулою (3.49) розраховується кількість отворів на тарілці

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

$$n = \frac{S_0}{S'_0} = \frac{0,0785}{0,00011} = 714 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,038 \cdot 714 = 27,12 \text{ м}$$

$$T = \frac{27,12}{1} = 27,12$$

$$Lg(1,7 / 27,12^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-0,49 = -0,622$$

$$\Delta = 0,13$$

За рівнянням (3.33) розраховується четверта інтеграція при  $f = 0,16\%$

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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,16^2} \cdot \frac{2,361}{1579} \cdot \left( \frac{0,42 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,66$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (3.43)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (3.44)

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

За формулою (3.46) розраховується площу всіх отворів, м<sup>2</sup>

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 0,785 \cdot 0,16 = 0,13 \text{ м}^2$$

За формулою (3.49) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

$$n = \frac{S_0}{S'_0} = \frac{0,13}{0,00011} = 1142 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,038 \cdot 1142 = 43,4 \text{ м}$$

$$T = \frac{43,4}{1} = 43,4$$

$$Lg(0,66 / 43,4^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

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

$$\Delta = 0,72$$

За рівнянням (3.33) розраховується п'ята інтеграція при  $f = 0,2\%$

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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,2^2} \cdot \frac{2,361}{1579} \cdot \left( \frac{0,42 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,425$$

Розраховуємо коефіцієнт T за формулою (3.43)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (3.44)

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

За формулою (3.46) розраховується площу всіх отворів

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 0,785 \cdot 0,2 = 0,157 \text{ м}^2$$

За формулою (3.49) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

$$n = \frac{0,157}{0,00011} = 1428 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,038 \cdot 1428 = 54,24 \text{ м}$$

$$T = \frac{54,24}{1} = 54,24$$

$$Lg(0,425 / 54,24^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-1,44 = -0,622$$

$$\Delta = 0,82$$

За рівнянням (3.33) розраховується шоста інтеграція при  $f = 0,25\%$

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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,25^2} \cdot \frac{2,361}{1579} \cdot \left( \frac{0,42 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,272$$

Розраховується коефіцієнт T за формулою (3.43)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (3.44)

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

За формулою (3.46) розраховується площу всіх отворів

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 0,785 \cdot 0,25 = 0,196 \text{ м}^2$$

За формулою (3.49) розраховується кількість отворів на тарілці

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

$$n = \frac{0,196}{0,00011} = 1785 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,038 \cdot 1785 = 67,8 \text{ м}$$

$$T = \frac{67,8}{1} = 67,8$$

$$Lg(0,272 / 67,8^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-1,48 = -0,622$$

$$\Delta = 0,86$$

За рівнянням (3.33) розраховується сьома інтеграція при  $f = 0,3\%$

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

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

$$Y = \frac{1^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,3^2} \cdot \frac{2,361}{1579} \cdot \left( \frac{0,42 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,19$$

Розраховується коефіцієнт T за формулою (3.43)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (3.44)

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

За формулою (3.46) розраховується площу всіх отворів

$$S_0 = S \cdot f$$

$$S_0 = 0,785 \cdot 0,3 = 0,2355 \text{ м}^2$$

За формулою (3.49) розраховується кількість отворів на тарілці

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

$$n = \frac{0,2355}{0,00011} = 2141 \text{ шт}$$

$$\sum \Pi = 0,038 \cdot 2141 = 81,4 \text{ м}$$

$$T = \frac{81,4}{1} = 81,4$$

$$Lg(0,19 / 81,4^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-1,68 = -0,622$$

$$\Delta = 1,05$$

Таблиця 3.2 – Залежність величин  $\Delta$  від вільного перетину  $f$

f	0,06	0,08	0,1	0,16	0,2	0,25	0,3
$\Delta$	0,54	0,38	0,13	0,72	0,82	0,86	1,05



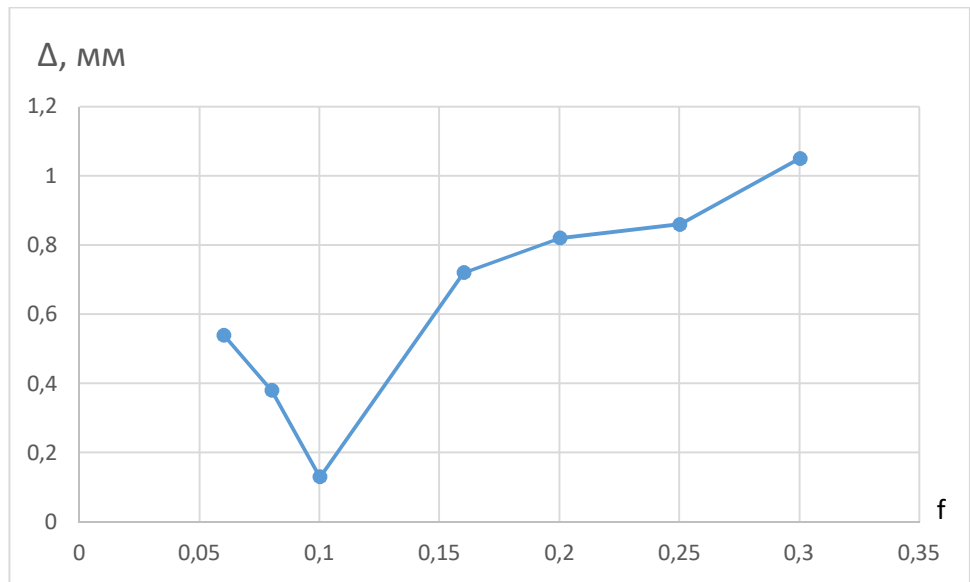


Рисунок 3.1 – Графік залежності  $\Delta$  від вільного перетину  $f$ .

Величина  $\Delta$  є мінімальною на графіку у точці, яка відповідає вільному перетину  $f=0,1\%$ , тому для колони з діаметром  $D=1,0$  м вибираємо тарілки з вільним перетином  $f=0,1 \%$ .

Визначаємо кількість отворів тарілки:

$$n = \frac{F_{\text{отв}} \cdot F_{\text{отв}}}{F} = \frac{0,785 \cdot 0,012^2}{0,785^2} = 0,1$$

$$n = \frac{0,785^2 \cdot 0,1}{0,012^2 \cdot 0,785} = 546 \text{ шт}$$

### 3.6 Розрахунок вільного перерізу тарілки провального типу $D = 0,057$ м

Приймаємо діаметр колони  $D = 0,057$  м та рекомендована швидкість пари у колонні  $W = 1,2$  м/с

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

тоді

$$V = w \cdot 0,785 D^2 = 1,2 \cdot 0,785 \cdot 0,057^2 = 0,0031 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$G_n = V \cdot \rho_n$$

$$G_n = 0,0031 \cdot 2,361 = 0,0072 \text{ кг/с}$$

Приймається щільність зрошування

$$L = 2,8, \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$$

тоді кількість рідини в модельній колоні

$$G_p = L \cdot S$$

$$G_p = \frac{2,8}{0,785} = 2,2 \text{ кг/год}$$

Розраховується витрату пари

$$V_n = S \cdot W$$

$$V_n = 0,00255 \cdot 1,2 = 0,003 \text{ лкг/с}$$

Розраховується витрату рідини

$$V_p = L \cdot S$$

$$V_p = 2,8 \cdot 0,00255 = 0,0071 \text{ лкг/с}$$

За рівнянням (3.33) 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

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

де  $w$  – рекомендована швидкість пари у колонні,  $w = 1,2$

$\rho_p$  – питома вага рідини,  $\rho_p = 1579 \text{ кг/м}^3$ ;

$\rho_g$  – питома вага газу (пара),  $\rho_g = 2,361 \text{ кг/м}^3$ ;

$g$  – прискорення сили тяжіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$d_0$  – діаметр отворів в тарілці,  $d_0 = 0,012 \text{ м}$

$\mu_p$  – в'язкість рідини,  $\mu_p = 0,42 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;

$\mu_g$  – в'язкість води при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu_g = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;

$$Y = \frac{1,2^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,06^2} \cdot \frac{2,361}{1579} \cdot \left( \frac{0,42 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 2,69$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (3.43)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (58)

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

За формулою (3.45) розраховується периметр отворів

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

За формулою (3.46) розраховується площу всіх отворів

$$S_0 = S \cdot f$$

За формулою (3.47) розраховується площу колони

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

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

За формулою (3.48) розраховується площу одного отвору

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

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

За формулою (3.49) розраховується кількість отворів на тарілці

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

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

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

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

$X$  – комплекс нанесений на осі абсцис

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

$$X = \left( \frac{3,105}{4,140} \right)^{1/4} \cdot \left( \frac{2,361}{1579} \right)^{1/8} = 0,415$$

$$Lg(2.69 / 1,321^{0.5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$0,37 = -0,62$$

$$\Delta = 0.99$$

За рівнянням (3.33) 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

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

$$Y = \frac{1,2^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,08^2} \cdot \frac{2,361}{1579} \cdot \left( \frac{0,42 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 1,56$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (3.43)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (3.44)

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

За формулою (3.46) розраховується площу всіх отворів

$$S_0 = S \cdot f$$

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

За формулою (3.49) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

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

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

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

$$Lg(1,56 / 1,754^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$0,07 = -0,62$$

$$\Delta = 0,69$$

За рівнянням (3.33) 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

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

$$Y = \frac{1,2^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,1^2} \cdot \frac{2,361}{1579} \cdot \left( \frac{0,42 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 1$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (3.43)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (3.44)

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

За формулою (3.46) розраховується площу всіх отворів

$$S_0 = S \cdot f$$

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

За формулою (3.49) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

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

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

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

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

$$-0,28 = -0,62$$

$$\Delta = 0,45$$

За рівнянням (3.33) розраховується одинадцята інтеграція при  $f = 0,16\%$

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

де  $Y$  – комплекс нанесений на осі ординат

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

$$Y = \frac{1,2^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,16^2} \cdot \frac{2,361}{1579} \cdot \left( \frac{0,42 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,39$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (3.43)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (3.44)

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

За формулою (3.46) розраховується площу всіх отворів

$$S_0 = S \cdot f$$

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

За формулою (3.49) розраховується кількість отворів на тарілці

$$n = \frac{S_0}{S_1}$$

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

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

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

$$Lg(0.39 / 3,525^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$0.392 = -0,622$$

$$\Delta = 0,23$$

За рівнянням (3.33) 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

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

$$Y = \frac{1,2^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,2^2} \cdot \frac{2,361}{1579} \cdot \left( \frac{0,42 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,25$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (3.43)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (3.44)

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

За формулою (3.46) 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 (3.49) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

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

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

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

$$Lg(0,25 / 4,4^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-0,924 = -0,622$$

$$\Delta = 0,3$$

За рівнянням (3.33) 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

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

$$Y = \frac{1,2^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,25^2} \cdot \frac{2,361}{1579} \cdot \left( \frac{0,42 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,16$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (3.43)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (3.44)

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

За формулою (3.46) розраховується площу всіх отворів

$$S_0 = S \cdot f$$

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

За формулою (3.49) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

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

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

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

$$Lg(0,16 / 5,62^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-1,17 = -0,62$$

$$\Delta = 0,55$$

За рівнянням (3.33) 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

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

$$Y = \frac{1,2^2}{9,81 \cdot 0,012 \cdot 0,3^2} \cdot \frac{2,361}{1579} \cdot \left( \frac{0,42 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,16} = 0,111$$

Розраховується коефіцієнт  $T$  за формулою (3.43)

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

Розраховується сумарний периметр отворів за формулою (3.44)

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

За формулою (3.46) розраховується площу всіх отворів,  $\text{м}^2$

$$S_0 = S \cdot f$$

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

За формулою (3.49) розраховується кількість отворів на тарілці, шт.

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

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

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

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

$$Lg(0,111 / 6,613^{0,5}) = 0,0751 - 1,68 \cdot 0,415$$

$$-1,36 = -0,62$$



$$\Delta = 0,74$$

Таблиця 3.2 – Залежність величин  $\Delta$  від вільного перетину  $f$

f	0,06	0,08	0,1	0,16	0,2	0,25	0,3
$\Delta$	0.99	0.69	0.45	0.23	0.3	0.55	0.74

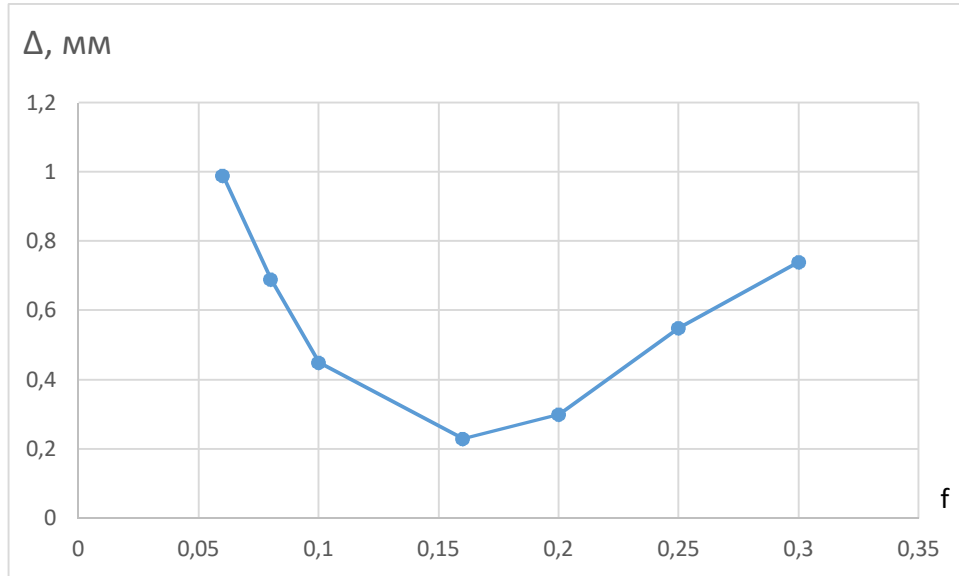


Рисунок 3.2 – Графік залежності  $\Delta$  від вільного перетину  $f$ .

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

Висновки: проведено гідродинамічне моделювання режимів роботи тарілок провального типу на прикладі розрахунку колони основної ректифікації суміші нітратна кислота-ортофосфорна кислота потужністю 10 тис. т/рік. При гідродинамічному моделюванні були використанні дослідні данні одержані на колонні діаметром 57 мм на модельній системі вода-повітря.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ

### 4.1 Загальні питання з охорони праці

Умови праці на робочому місці, безпека технологічних процесів, машин, механізмів, устаткування та інших засобів виробництва, стан засобів колективного та індивідуального захисту, що використовуються працівником, а також санітарно-побутові умови повинні відповідати вимогам нормативних актів про охорону праці. Охорона праці - це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності.

Завданням даної магістерської роботи було дослідити гідродинамічне моделювання режимів роботи тарілок провального типу з розробкою колони ректифікації суміші нітратна кислота-ортофосфорна кислота потужністю 10 тис. т/рік. Дана робота з точки зору питань з охорони праці проводилась в офісному приміщенні при нормальних кліматичних умовах з використанням сучасного персонального комп'ютера та офісної техніки (принтера та сканера).

При роботі з обчислювальною технікою змінюються фізичні і хімічні фактори навколишнього середовища: виникає статична електрика, електромагнітне випромінювання, змінюється температура і вологість, рівень вміст кисню і озону в повітрі. Повітря забруднюється шкідливими хімічними речовинами антропогенного походження за рахунок деструкції полімерних матеріалів, які використовуються для обробки приміщень та обладнання. Неправильна організація робочого місця сприяє загальному і локальній напрузі м'язів шиї, тулуба, верхніх кінцівок, викривлення хребта і розвитку остеохондрозу. На всіх підприємствах, в установах, організаціях повинні створюватися безпечні і нешкідливі умови праці. Забезпечення цих умов покладається на власника або уповноважений ним орган (далі роботодавець). Умови праці на робочому місці, безпека технологічних процесів, машин, механізмів, устаткування та інших засобів виробництва, стан

засобів колективного та індивідуального захисту, що використовуються працівником, а також санітарно-побутові умови повинні відповідати вимогам нормативних актів про охорону праці. Роботодавець повинен впроваджувати сучасні засоби техніки безпеки, які запобігають виробничому травматизмові, і забезпечувати санітарно-гігієнічні умови, що запобігають виникненню професійних захворювань працівників. Він не має права вимагати від працівника виконання роботи, поєднаної з явною небезпекою для життя, а також в умовах, що не відповідають законодавству про охорону праці. Працівник має право відмовитися від дорученої роботи, якщо створилася виробнича ситуація, небезпечна для його життя чи здоров'я або людей, які його оточують, і навколишнього середовища.

#### 4.1.1 Правові та організаційні основи охорони праці

Основним організаційним напрямом у здійсненні управління в сфері охорони праці є усвідомлення пріоритету безпеки праці і підвищення соціальної відповідальності держави, і особистої відповідальності працівників.

Державна політика в галузі охорони праці визначається відповідно до Конституції України Верховною Радою України і спрямована на створення належних, безпечних і здорових умов праці, запобігання нещасним випадкам та професійним захворюванням. Відповідно до статті 3 законодавство про охорону праці складається з прийнятих відповідно до них нормативно-правових актів, норм міжнародного договору (ратифіковані Конвенції і Рекомендації МОТ, директиви Європейської Ради).

На законодавчому рівні визначено такі пріоритетні напрямки з безпеки праці:

- кожен працівник несе безпосередню відповідальність за порушення зазначених Законом, нормами і правилами вимог;
- напрямки реалізації конституційного права громадян на їх життя і здоров'я в процесі трудової діяльності:
- пріоритет життя і здоров'я працівників по відношенню до результатів виробничої діяльності підприємства;
- повна відповідальність роботодавця за створення належних – безпечних і

здорових умов праці;

- соціальний захист працівників, повне відшкодування збитків особам, які потерпіли від нещасних випадків на виробництві та професійних захворювань;

- комплексне розв'язання завдань охорони праці;

- підвищення рівня промислової безпеки шляхом забезпечення суцільного технічного контролю за станом виробництв, технологій та продукції, а також сприяння підприємствам у створенні безпечних та нешкідливих умов праці;

- соціальний захист працівників, повне відшкодування збитків особам, які потерпіли від нещасних випадків на виробництві та професійних захворювань;

- використання економічних методів управління охороною праці, участь держави у фінансуванні заходів щодо охорони праці;

- використання світового досвіду організації роботи щодо поліпшення умов і підвищення безпеки праці на основі міжнародної співпраці.

Користувачі персональних комп'ютерів, для яких ця робота є головною, підлягають медичним оглядам: попереднім – під час влаштування на роботу і періодичним – протягом професійної діяльності раз на два роки. Жінок з часу встановлення вагітності та в період годування дитини грудьми до роботи з ПК не допускають.

Обов'язки працівників щодо додержання вимог нормативно-правових актів з охорони праці (ст. 14) [27], відповідальність робітників всіх категорій за порушення вимог щодо охорони праці (ст. 44) [27] та структура організації/виробництв системи управління охорони праці визначені безпосередньо «Інструкцією на робоче місце № 1», та іншими затвердженими власними нормативними актами з питань охорони праці (правилами, нормами, регламентами, положеннями, стандартами, інструкціями та іншими документами, обов'язковими до виконання), тобто тих, що діють на підприємстві або організації.

Наявні трудові відносини між працівниками і роботодавцями в Україні за темою роботи регулюються, відповідно до якого права працюючої людини на охорону праці охороняються всебічно та норми охорони праці неухильно інтегровані до правил внутрішнього розпорядку організації/підприємства.

#### 4.1.2 Організаційно-технічні заходи з безпеки праці

В організації (підприємстві) проводиться навчання і перевірка знань з питань охорони праці відповідно до вимог, затвердженого наказом Держнаглядохоронпраці України від 26.01.2005 N 15, зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 15.02.2005 за N 231/10511.

Також впроваджені організаційні заходи з пожежної безпеки - навчання і перевірку знань відповідно до вимог, затвердженого наказом Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи від 29.09.2003 N 368, зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 11.12.2003 за N 1148/8469.

Обов'язковими вимогами враховане наступне:

– не слід допускати до роботи осіб, що в установленому порядку не пройшли навчання, інструктаж та перевірку знань з охорони праці, пожежної безпеки та цих Правил.

– на підприємстві/організації, де експлуатуються ПК з ВДТ і ПП, розробляється інструкція з охорони праці відповідно до вимог, затвердженого наказом Держнаглядохоронпраці від 29.01.98 N 9, зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 07.04.98 за N 226/2666.

– ознайомлення з правилами безпеки праці, одержання відповідних інструктажів засвідчується у журналі інструктажів.

– перед допуском до самостійної роботи кожен працівник має право на навчання з питань охорони праці і роботодавець зобов'язаний, і проводить таке навчання у вигляді двох інструктажів з питань охорони праці:

1. Вступного, який проводять працівники служби охорони праці об'єкта господарювання з усіма працівниками, яких приймають на роботу незалежно від їхньої освіти та стажу роботи за програмою, в якій подають загальні питання охорони праці із врахуванням її особливостей на об'єкті господарювання;

2. Первинного, який проводять керівники структурних підрозділів на місці праці з кожним працівником до початку їхньої роботи на цьому робочому місці.

Проходження працівником цих інструктажів з питань охорони праці підтверджується записами у відповідних журналах обліку інструктажів і

скріплюється підписами осіб, які проводили інструктажі та осіб, які отримали інструктажі.

3. Повторний (не рідше одного разу в 6 місяців);

4. Позаплановий (при зміні правил охорони праці);

5. Поточний (проводять з працівниками перед виконанням робіт, на яких оформляється наряд-допуск)

– обов'язкові організаційні заходи перед початком, під час і після завершення роботи повинні включати перевірку (візуально) наявності і справності електрообладнання та його заземлення, а під час виконання роботи вимогу «не залишати без нагляду обладнання, яке працює». Після закінчення роботи - вимагається прибирання робочого місця, відключення всіх електроприладів від електромережі.

Не допускається:

– виконувати обслуговування, ремонт та налагодження ПК з ВДТ і ПП безпосередньо на робочому місці оператора;

– зберігати біля ПК з ВДТ і ПП папір, дискети, інші носії інформації, запасні блоки, деталі тощо, якщо вони не використовуються для поточної роботи;

– відключати захисні пристрої, самочинно проводити зміни у конструкції та складі ПК з ВДТ і ПП або їх технічне налагодження;

– працювати з ВДТ, у яких під час роботи з'являються нехарактерні сигнали, нестабільне зображення на екрані тощо;

– працювати з матричним принтером за відсутності вібраційного килимка та зі знятою (піднятою) верхньою кришкою.

## 4.2 Аналіз стану умов праці

### 4.2.1 Вимоги до приміщень

Робота над створенням такої системи проходитиме в приміщенні відповідної установи (компанії, підприємстві тощо). Для даної роботи достатньо однієї людини, для якої надано робоче місце зі стаціонарним комп'ютером. ГПКетричні розміри приміщення зазначені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Розміри приміщення

Найменування	Значення
Довжина, м	5
Ширина, м	5
Висота, м	3
Площа, м <sup>2</sup>	25
Об'єм, м <sup>3</sup>	75

Розмір площі для одного робочого місця оператора персонального комп'ютера має бути не менше 6 кв. м, а об'єм – не менше 20 куб. м. Отже, дане приміщення цілком відповідає зазначеним нормам. Для зручності спільної роботи з іншими працівниками (обговорення ідей, з'ясування проблем і т.д.) в кімнаті є дивани і журнальний стіл, обставлені живими квітами. Також робочий процес пов'язаний з багатьма документами, теками, журналами для чого приміщення облаштоване принтером і шафою для зручності. Задля дотримання визначеного рівня мікроклімату в будівлі встановлено систему опалення та кондиціонування. Для забезпечення потрібного рівного освітленості кімната має вікно та систему загального рівномірного освітлення, що встановлена на стелі. Для дотримання вимог пожежної безпеки встановлено порошковий вогнегасник та систему автоматичної пожежної сигналізації.

### 4.2.2 Вимоги до організації місця праці

При порівнянні відповідності характеристик робочого місця нормативним основні вимоги до організації робочого місця [34] і відповідними фактичними значеннями для робочого місця, констатуємо повну відповідність в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Характеристики робочого місця

Найменування параметра	Фактичне значення	Нормативне значення
Висота робочої поверхні, мм	750	680 – 800
Висота простору для ніг, мм	730	не менше 600
Ширина простору для ніг, мм	660	не менше 500
Глибина простору для ніг, мм	700	не менше 650
Висота поверхні сидіння, мм	470	400 □ 500
Ширина сидіння, мм	400	не менше 400
Глибина сидіння, мм	400	не менше 400
Висота поверхні спинки, мм	600	не менше 300
Ширина опорної поверхні спинки, мм	500	не менше 380
Радіус кривини спинки в горизонтальній площині, мм	400	400
Відстань від очей до екрану дисплея, мм	800	700 – 800

Робочий стіл на досліджуваному місці також містить достатньо простору для ніг. Крісло, що використовується в якості робочого сидіння, є підйомно-поворотним, має підлокітники і можливість регулювання за висотою і кутом нахилу спинки, також воно м'яке і виконане з екологічної шкіри, що дає можливість працювати у комфорті. Екран монітору знаходиться на відстані 0.8 м, клавіатура має можливість регулювання кута нахилу 5-15°. Отже, за всіма параметрами робоче місце відповідає нормативним вимогам.

Приміщення кабінету знаходиться на другому поверсі трьох поверхової будівлі і має об'єм 78 м<sup>3</sup>, площу – 18 м<sup>2</sup>. У цьому кабінеті обладнано три місця праці, з яких два укомплектовані ПК.

Температура в приміщенні протягом року коливається у межах 18–24°C, відносна вологість – близько 50%. Швидкість руху повітря не перевищує 0,2 м/с. Шум на робочому місці знаходиться на рівні 50 дБА. Система вентилявання приміщення – природна неорганізована, а опалення – централізоване.

Розміщення вікон забезпечує природне освітлення з коефіцієнтом природного освітлення не менше 1,5%, а загальне штучне освітлення, яке здійснюється за допомогою восьми люмінесцентних ламп, забезпечує рівень освітленості не менше 200 Лк.

У кабінеті є електрична мережа з напругою 220 В, яка створює небезпеку



ураження електричним струмом. ПК та периферійні пристрої можуть бути джерелами електромагнітних випромінювань, аерозолів та шкідливих речовин (часток тонеру, оксидів нітрогену та озону).

За ступенем пожежної безпеки приміщення належить до категорії В. Кабінет має бути оснащений переносним вуглекислотним вогнегасником ВВК-5.

Наявна аптечка для надання долікарської допомоги, а також у кабінеті роблять вологе прибирання та щоденно провітрюють приміщення.

#### 4.2.3 Навантаження та напруженість процесу праці

Як приклад наведено опис процесу праці оформлення роботи під час виконання магістерської роботи за фізичним навантаженням робота відноситься до категорії легкі роботи (Ia), її виконують сидячи з періодичним ходінням. Щодо характеру організації роботи, то розділи роботи необхідно виконати у встановлені конкретні терміни. За ступенем нервово-психічної напруги виконання роботи можна віднести до II – III ступеня і кваліфікувати як помірно напружений – напружений за умови успішного виконання поставлених завдань.

Під час виконання робіт використовують ПК та периферійні пристрої, що призводить до навантаження на окремі системи організму. Такі перекоси у напруженні різних систем організму, що трапляються під час роботи з ПК, зокрема, значна напруженість зорового аналізатора і довготривале малорухоме положення перед екраном, не тільки не зменшують загального напруження, а навпаки, призводять до його посилення і появи стресових реакцій.

Найбільшому ризику виникнення різноманітних порушень піддаються: органи зору, м'язово скелетна система, нервово-психічна діяльність, репродуктивна функція у жінок.

Тобто наявне психофізіологічні небезпечні та шкідливі фактори:

а) фізичного перевантаження:

- статичного;

- динамічного;

б) нервово-психічного перевантаження:

- розумового перенапруження;

- монотонності праці;

- перенапруження аналізаторів;
- емоційних перевантажень.

Роботу за дипломним проектом визнано, таку, що займає 50% часу робочого дня та за восьмигодинної робочої зміни рекомендовано встановити додаткові регламентовані перерви:

- для розробників програм тривалістю 15 хв. через кожну годину роботи.

### 4.3 Виробнича санітарія

На підставі аналізу небезпечних та шкідливих факторів при виробництві (експлуатації), пожежної безпеки можуть бути надалі вирішені питання необхідності забезпечення працюючих достатньою кількістю освітлення, вентиляції повітря, організації заземлення, тощо.

#### 4.3.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів при роботі на ПК

Роботу, пов'язану з персональним комп'ютером (далі – ПК) з відео дисплейними терміналами (далі - ВДТ), у тому числі на тих, які мають робочі місця, обладнані ПК з ВДТ і периферійними пристроями (далі - ПП), виконують із забезпеченням виконання [35], які встановлюють вимоги безпеки до обладнання робочих місць, до роботи із застосуванням ПК з ВДТ і ПП. Переважно роботи за проектами виконують у кабінетах чи інших приміщеннях, де використовують різноманітне електрообладнання, зокрема персональні комп'ютери (ПК) та периферійні пристрої.

Робочі місця мають відповідати вимогам [34, 35].

Це передбачає, що визначена виробнича діяльність пов'язана з наявністю певної кількості небезпечних та/або шкідливих виробничих факторів. Тому у першій частині цього підрозділу за результатами аналізу повинні бути визначені такі фактори.

Робота ПК та периферійних пристроїв супроводжує виділення багатьох хімічних речовин, зокрема озону, оксидів нітрогену та аерозолів (високодисперсних частинок тонера). Для прикладу, за умов роботи з ПК виникають наступні небезпечні та шкідливі чинники: несприятливі

мікрокліматичні умови, освітлення, електромагнітні випромінювання, забруднення повітря шкідливими речовинами (джерелом яких може бути принтер, сканер та ін.), шум, вібрація, електричний струм, електростатичне поле, напруженість трудового процесу та інше.

Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів виконується у табличній формі (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 - Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Небезпечні і шкідливі виробничі фактори	Джерела факторів (види робіт)	Кількісна оцінка	Нормативні документи
1	2	3	4
<b>фізичні</b>			
- підвищена температура поверхонь обладнання	Експлуатація ПК	2	ДСН 3.3.6.042-99
- підвищений рівень шуму на робочому місці	Система охолодження ПК	2	ДСН 3.3.6.037-99
- підвищений рівень вібрації	Система охолодження ПК, привід	2	ДСН 3.3.6.039-99 ДСТУ ГОСТ 12.1.012-90
- недостатність природного світла	Порушення умов праці (вимог до приміщень)	2	ДБН В.2.5-28:2015
- недостатнє освітлення робочої зони	Порушення гігієнічних параметрів виробничого середовища	3	ДБН В.2.5-28:2015
- підвищена яскравість світла	Порушення умов праці (організації місця праці-налагодження моніторів)	1	ДСанПіН 3.3.2.007-98
<b>психофізіологічні:</b>			
- нервово-психічна перевантаження (розумове, перенапруження аналізаторів-зорових)	- пошук інформації для постановки теми; - пошук та аналіз аналогів і літератури; - пошук наявних технологій, моделювання та аналіз алгоритмів; - виконання роботи за темою диплома, тестування; - оформлення роботи	4	НПАОП 0.00-1.28-10 ДСанПіН 3.3.2.007-98
- фізичні (статичне – сидіння)	порушення умов праці (організації місця праці-сидіння користувача, ) та організації робочого часу - безпервна робота)	2	НПАОП 0.00-1.28-10 ДСанПіН 3.3.2.007-98

#### 4.3.2 Пожежна безпека

Небезпека розвитку пожежі на обчислювальному центрі обумовлюється застосуванням розгалужених систем електроживлення ПК, вентиляції і кондиціонування. Небезпека загоряння пов'язана з особливістю комп'ютерів - із значною кількістю щільно розташованих на монтажній платі і блоках електронних вузлів і схем, електричних і комутаційних кабелів, резисторів, конденсаторів, напівпровідникових діодів і транзисторів. Надійна робота окремих елементів і мікросхем в цілому забезпечується тільки в певних інтервалах температури, вологості і при заданих електричних параметрах. При відхиленні реальних умов експлуатації від розрахункових можуть виникнути пожежонебезпечні ситуації.

Висока щільність елементів в електронних схемах призводить до значного підвищення температури окремих вузлів (80...100 °С). При проходженні електричного струму по провідниках і деталей виділяється тепло, що в умовах їх високої щільності може привести до перегріву, і може служити причиною запалювання ізоляційних матеріалів. Слабкий опір ізоляційних матеріалів дії температури може викликати порушення ізоляції і привести до короткого замикання між струмоведучими частинами обладнання (шини, електроди). Також ймовірна небезпека внаслідок перевантаження напруги, розрядки зарядів статичної електрики, пошкодження обладнання та електропроводки. Електростатичний розряд виникає під час тертя двох ізольованих матеріалів.

Пожежна безпека при застосуванні ПК забезпечується:

- системою запобігання пожежі,
- системою протипожежного захисту,
- організаційно-технічними заходами.

Таке приміщення, площею 25 м<sup>2</sup>, відноситься до категорії "В" (пожежонебезпечної) та для протипожежного захисту в ньому проектом передбачено устаткування автоматичною пожежною сигналізацією із застосуванням датчиків-сповіщувачів РІД-1 (сповіщувач димовий ізоляційний) в кількості 1 шт., і застосуванням первинних засобів пожежогасіння. Відповідно до норм первинних засобів пожежогасіння пропонується використовувати:

- ручний вуглекислий вогнегасник ОУ-5 в кількості 1 шт.

– повсть 1 1 м<sup>2</sup>, кошму 2×1,5 м<sup>2</sup> або азбестове полотно 2×2 м<sup>2</sup> в кількості 1 шт.

Виникнення пожежі можливе, якщо на об'єкті є горючі речовини, окислювач і джерела запалювання. Вірогідність пожежної небезпеки приймається значною, якщо ймовірна взаємодія цих трьох чинників. Горючими компонентами є: будівельні матеріали для акустичної і естетичної обробки приміщень, перегородки, підлоги, двері, ізоляція силових, сигнальних кабелів і т.д.

Горючими матеріалами в приміщенні, де розташовані ПК, є:

– поліамід – матеріал корпусу мікросхем, горюча речовина, температура самозаймання 420 С,

– полівінілхлорид – ізоляційний матеріал, горюча речовина, температура запалювання 335 С, температура самозаймання 530 С,

– склотекстоліт ДЦ – матеріал друкарських плат, важкогорючий матеріал, показник горючості 1.74, не схильний до температурного самозаймання,

– пластикат кабельний №.489 – матеріал ізоляції кабелів, горючий матеріал, показник горючості більше 2.1,

– деревина – будівельний і обробний матеріал, з якого виготовлені меблі, горючий матеріал, показник горючості більше 2.1, температура запалювання 255 С, температура самозаймання 399 С.

Для відводу теплоти від ПК діє система кондиціонування. Тому кисень, як окиснювач процесів горіння, є в будь-якій точці приміщень ВЦ.

Простори усередині приміщень в межах, яких можуть утворюватися або знаходиться пожежонебезпечні речовини і матеріали відносяться до пожежонебезпечної зони класу П-Па. Це обумовлено тим, що в приміщенні знаходяться тверді горючі та важкозаймисті речовини та матеріали. Приміщенню, у якому розташоване робоче місце, присвоюється II ступень вогнестійкості.

Потенційними джерелами запалювання можуть бути:

– іскри і дуги короткого замикання;

– електрична іскра при замиканні і розмиканні ланцюгів;

– перегріву від тривалого перевантаження,

– відкритий вогонь і продукти горіння,

- наявність речовин, нагрітих вище за температуру самозаймання,
- розрядна статична електрика.

Причинами можливого загоряння і пожежі можуть бути:

- несправність електроустановки;
- конструктивні недоліки устаткування;
- коротке замикання в електричних мережах;
- запалювання горючих матеріалів, що знаходяться в безпосередній близькості від електроустановки.

Продуктами згоряння, що виділяються на пожежі, є: окис вуглецю; сірчистий газ; окис азоту; синильна кислота; акромін; фосген; хлор і ін. При горінні пластмас, окрім звичних продуктів згоряння, виділяються різні продукти термічного розкладання: хлорангідридні кислоти, формальдегіди, хлористий водень, фосген, синильна кислота, аміак, фенол, ацетон, стирол.

Для захисту персоналу від дії небезпечних і шкідливих чинників пожежі проектом передбачається застосування промислового протигаза, що фільтрує, з коробкою марки «В» із сірою відміткою забарвлення – захист від неорганічних газів (хлор, фтор, бром, сірководень, сірковуглець, хлорціан, галогени), а цей фільтр не захистить від СО (тобто від чадного газу).

Можливе також відповідне застосування фільтрувальної коробки з маркуванням «СО» із фіолетовим забарвленням на фільтрі означає, що він захищає від Чадного газу. Або фільтру для протигазу з літерним маркуванням «SX» із фіолетовим забарвленням захистить від спец речовин таких як (зарин, зоман та фосген).

#### 4.3.3 Електробезпека

На робочому місці виконуються наступні вимоги електробезпеки: ПК, периферійні пристрої та устаткування для обслуговування, електропроводи і кабелі за виконанням та ступенем захисту відповідають класу зони за ПУЕ (правила улаштування електроустановок), мають апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів. Лінія електромережі для живлення ПК, периферійних пристроїв і устаткування для обслуговування, виконана як окрема групова три-провідна мережа, шляхом прокладання фазового, нульового робочого

та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів. Штепсельні з'єднання та електророзетки крім контактів фазового та нульового робочого провідників мають спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника. Електромережа штепсельних розеток для живлення персональних ПК, укладено по підлозі поруч зі стінами відповідно до затвердженого плану розміщення обладнання та технічних характеристик обладнання. Металеві труби та гнучкі металеві рукави заземлені. Захисне заземлення включає в себе заземлюючих пристроїв і провідник, який з'єднує заземлюючий пристрій з обладнанням, яке заземлюється - заземлюючий провідник.

#### 4.4 Гігієнічні вимоги до параметрів виробничого середовища

##### 4.4.1 Мікроклімат

Мікроклімат робочих приміщень – це клімат внутрішнього середовища цих приміщень, що визначається діючої на організм людини з'єднанням температури, вологості, швидкості переміщення повітря. В даному приміщенні проводяться роботи, що виконуються сидячи і не потребують динамічного фізичного напруження, то для нього відповідає категорія робіт Ia. Отже оптимальні значення для температури, відносної вологості й рухливості повітря для зазначеного робочого місця відповідають [39] і наведені в таблиці 4.4:

Таблиця 4.4 – Норми мікроклімату робочої зони об'єкту

Період року	Категорія робіт	Температура С°	Відносна вологість %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодна	легка-1 а	22 - 24	40 – 60	0,1
Тепла	легка-1 а	23 - 25	40 – 60	0,1

Дане приміщення обладнане системами опалення, кондиціонування повітря або припливно-витяжною вентиляцією. У приміщенні на робочому місці забезпечуються оптимальні значення параметрів мікроклімату: температури,

відносної вологості й рухливості повітря. Рівні позитивних і негативних іонів у повітрі мають відповідати ДСН 3.3.6.042-99. «Санітарні норми мікроклімату виробничих». Для забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату в приміщенні проводяться перерви в роботі користувача, з метою його провітрювання. Існують спеціальні системи кондиціонування, які забезпечують підтримання в приміщенні балансу оптимальних параметрів мікроклімату. Контроль параметрів мікроклімату в холодний і теплий період року здійснюється не менше 3-х разів на зміну (на початку, середині, в кінці).

#### 4.4.2 Освітлення

Світло є природною умовою існування людини. Воно впливає на стан вищих психічних функцій і фізіологічні процеси в організмі. Хороше освітлення діє тонізуюче, створює гарний настрій, покращує протікання основних процесів вищої нервової діяльності.

Збільшення освітленості сприяє поліпшенню працездатності навіть в тих випадках, коли процес праці практично не залежить від зорового сприйняття. При поганому освітленні людина швидко втомлюється, працює менш продуктивно, виникає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків.

Освітленість приміщення має велике значення при роботі на ППК. Вона багато в чому визначається колірною і мережевий обстановкою. Для зменшеного поглинання світла стеля і стіни вище панелей (1,5-1,7м.). Якщо вони не облицьовані звукопоглинальним матеріалом, фарбуються білою водоемульсійною фарбою (коефіцієнт відбиття повинен бути не менше 0,7). Для забарвлення стіни панелей рекомендується віддавати перевагу світлим фарбам.

Основний потік природного світла при цій повинен бути зліва. Не допускається спрямування основного світлового потоку природного світла праворуч, ззаду і спереду працівника на ППК.

Робота на ППК може здійснюватися за таких видах освітлення:

- загальному штучному освітленні, коли відео монітори розташовуються по периметру приміщення або при центральному розташуванні робочих місць у два ряди по довжині кімнати з екранами, звернені в протилежні сторони;
- суміщене освітлення (природне + штучне) тільки при одному і трьох



рядном розташуванні робочих місць, коли екран і поверхню робочого столу знаходяться перпендикулярно світла несучій стіні. При цьому штучне освітлення буде виконане стельовими або підвісними люмінесцентними світильниками, рівномірно розміщеними по стелі рядами паралельно світловим прорізам так, щоб екран відео монітора знаходився в зоні захисного кута світильника, і його проєкції не доводилися на екран. Працюючі на ПК не повинні бачити відображення світильників на екрані. Застосовувати місцеве освітлення при роботі на ПК не рекомендується.

Природне освітлення, коли робочі місця з ПК розташовуються в один ряд по довжині приміщення на відстані 0,8 - 1,0 м від стіни з віконними прорізами, і екрани знаходяться перпендикулярно цієї стіни. Основний потік природного світла при цій повинен бути зліва. Не допускається спрямування основного світлового потоку природного світла праворуч, ззаду і спереду працює на ПК. Оптимальна відстань очей до екрана відео монітора повинна становити 60-70 см, допустиме не менше 50 см. Розглядати інформацію ближче 50 см не рекомендується.

У проєкті, що розробляється, передбачається використовувати суміщене освітлення. У світлий час доби використовуватиметься природне освітлення приміщення через віконні отвори, в решту часу використовуватиметься штучне освітлення. Штучне освітлення створюється газорозрядними лампами.

Штучне освітлення в робочому приміщенні передбачається здійснювати з використанням люмінесцентних джерел світла в світильниках загального освітлення, оскільки люмінесцентні лампи мають високу потужність (80 Вт), тривалий термін служби (до 10000 годин), спектральний складом випромінюваного світла, близький до сонячного. При експлуатації ПК виконується зорова робота IV в розряді точності (середня точність). При цьому нормована освітленість на робочому місці ( $E_n$ ) рівна 200 лк. Джерелом природного освітлення є сонячне світло.

У приміщенні, де розташовані ПК передбачається природне бічне освітлення. Джерелом природного освітлення є сонячне світло. Регулярно повинен проводитися контроль освітленості, який підтверджує, що рівень освітленості задовольняє і для даного приміщення в світлий час доби достатньо природного

освітлення.

Розрахунок освітлення.

Для будівель виробництв світловий коефіцієнт приймається в межах 1/6 - 1/10:

$$\sqrt{a^2 + b^2} \cdot S_b = (1/8 \div 1/10) \cdot S_n \quad (4.1)$$

де  $S_b$  – площа віконних прорізів, м<sup>2</sup>;

$S_n$  – площа підлоги, м<sup>2</sup>.

$$S_n = a \cdot b = 5 \cdot 5 = 25 \text{ м}^2$$

$$S_{\text{вік}} = 1/8 \cdot 25 = 3,125 \text{ м}^2$$

Приймаємо 2 вікна площею 1,6 м<sup>2</sup> кожне.

Світильники загального освітлення розташовуються над робочими поверхнями в рівномірно-прямокутному порядку. Для організації освітлення в темний час доби передбачається обладнати приміщення, довжина якого складає 5 м, ширина 5 м, світильниками ЛПО2П, оснащеними лампами типа ЛБ (дві по 80 Вт) з світловим потоком 5400 лм кожна.

Розрахунок штучного освітлення виробляється по коефіцієнтах використання світлового потоку, яким визначається потік, необхідний для створення заданої освітленості при загальному рівномірному освітленні. Розрахунок кількості світильників  $N$  здійснюється по формулі:

$$n = \frac{E \cdot S \cdot Z \cdot K}{F \cdot U \cdot M} \quad (4.2)$$

де  $E$  – нормована освітленість робочої поверхні, визначається нормами – 300 лк;

$S$  – освітлювана площа, м<sup>2</sup>;  $S = 25 \text{ м}^2$ ;

$Z$  – поправочний коефіцієнт світильника (для стандартних світильників  $Z = (1.1 - 1.3)$  приймаємо рівним 1,1);

$K$  – коефіцієнт запасу, що враховує зниження освітленості в процесі експлуатації – 1,5;

$U$  – коефіцієнт використання, залежний від типу світильника, показника індексу приміщення і т.п. – 0,575

$M$  – число люмінесцентних ламп в світильнику – 2;

$F$  – світловий потік лампи – 5400лм.

Підставивши числові значення у формулу (4.2), отримуємо:

$$n = \frac{300 \cdot 25 \cdot 1,1 \cdot 1,5}{5400 \cdot 0,575 \cdot 2} = 2,64$$

Приймаємо освітлювальну установку, яка складається з 3-х світильників, які складаються з двох люмінесцентних ламп загальною потужністю 160 Вт, напругою – 220 В.

Потужність електроосвітлювальної установки з урахуванням місцевого освітлення визначається за формулою:

$$N = \frac{n \cdot W + (0,1 \div 0,2) \cdot n \cdot W}{1000} \quad (4.2)$$

де  $n$  – розрахункова кількість ламп для освітлення даного приміщення;

$W$  – потужність однієї лампи, Вт;

$(0,1 \div 0,2)$  – додаткова потужність для ламп місцевого освітлення, Вт.

$$N = \frac{3 \cdot 160 + (0,1 \div 0,2) \cdot 3 \cdot 160}{1000} = 0,576 \text{ кВт}$$

#### 4.4.3 Шум та вібрація, електромагнітне випромінювання

Рівень шуму, що супроводжує роботу користувачів персональних комп'ютерів, а також зовнішніми чинниками, коливається у межах 50–65 дБА. Шум такої інтенсивності на тлі високого ступеня напруженості праці негативно впливає на функціональний стан користувачів. Тому на практиці рекомендують

знижувати фактичний рівень шуму у приміщеннях, де створюють комп'ютерні програми, виконують теоретичні та творчі роботи, проводять навчання до 40 дБА, а в приміщеннях, де виконують роботу, що потребує зосередженості, — до 55 дБА. У залах опрацювання інформації та комп'ютерного набору рівні шуму не повинні перевищувати 65 дБА.

Шум часто є причиною зниження рівня працездатності, підвищення рівня загальної та професійної захворюваності, частоти виробничих травм. Шум є загальнобіологічним подразником, який негативно впливає на всі органи і системи організму. У разі тривалого систематичного впливу шуму може виникнути патологія з переважним ураженням слуху, центральної нервової і серцево-судинної систем.

Для зниження шуму на шляху його поширення передбачається розміщення в приміщенні штучних поглиначів. Для зниження рівня шуму стелю або стіни вище 1.5 - 1.7 метра від підлоги повинні облицьовуватися звукопоглинальним матеріалом з максимальним коефіцієнтом звукопоглинання в області частот 63-8000 Гц. Додатковим звукопоглинанням в КВТ можуть бути фіранки, підвішені в складку на відстані 15-20 см. Від огорожі, виконані з щільної, важкої тканини. У приміщенні з ПК коректований рівень звукової потужності не перевищує 45 дБА. Оскільки рівень шуму не перевищує гранично допустимих величин, які встановлені санітарними нормами, заходи для зниження шуму не проводяться.

Віброізоляція можливо здійснювати за допомогою спеціальної прокладки під системний блок, який послаблює передачу вібрацій робочого столу. Вібрація на робочому місці в приміщенні, що розглядається, відповідає нормам. Допустимий рівень вібрацій на робочому місці: - для 1 ступеня шкідливості до 3 дБ; - для 2-3 - 1-6 дБ; - для 3 - більше 6 дБ.

Для захисту від електромагнітного випромінювання передбачаються наступні заходи:

- застосування нових плазмових моніторів,
- віддалення робочого місця не менше, ніж на 0,4 – 0,5 м, оскільки напруженість електричного поля зменшується при віддаленні від джерела поля,
- встановлення раціональних режимів роботи персоналу (обмеження часу

перебування),

– раціональне розміщення в робочому приміщенні устаткування, що випромінює електромагнітну енергію.

#### 4.4.4 Вентилювання

У приміщенні, де знаходяться ПК, повітрообмін реалізується за допомогою природної організованої вентиляції (вентиляційні шахти). Цей метод має забезпечити приток потрібної кількості свіжого повітря, (30 м<sup>3</sup> на годину на одного працюючого).

Також має здійснюватися провітрювання приміщення, в залежності від погодних умов, тривалість повинна бути не менше 10 хв. Найкращий обмін повітря здійснюється при наскрізному провітрюванні.

#### 4.5 Заходи з організації виробничого середовища та попередження виникнення надзвичайних ситуацій

Відповідно до санітарно-гігієнічних нормативів та правил експлуатації обладнання наводимо приклади деяких заходів безпеки.

Заходи безпеки під час експлуатації персонального комп'ютера та периферійних пристроїв передбачають:

- правильне організування місця праці та дотримання оптимальних режимів праці та відпочинку під час роботи з ПК;
- експлуатацію сертифікованого обладнання;
- дотримання заходів електробезпеки;
- забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату;
- забезпечення раціонального освітлення місця праці (освітленість робочого місця не перевищувала 2/3 нормальної освітленості приміщення).

Зниження рівня шуму та вібрації:

- у джерелі виникнення, шляхом застосування раціональних конструкцій, нових матеріалів і технологічних процесів;
- звукоізолювання устаткування за допомогою глушників, резонаторів, кожухів, захисних конструкцій, оздоблення стін, стелі, підлоги тощо;

– використання засобів індивідуального захисту).

Заходи безпеки під час експлуатації інших електричних приладів передбачають дотримання таких правил:

– постійно стежити за справним станом електромережі, розподільних щитків, вимикачів, штепсельних розеток, лампових патронів, а також мережевих кабелів живлення, за допомогою яких електроприлади під'єднують до електромережі;

– постійно стежити за справністю ізоляції електромережі та мережевих кабелів, не допускаючи їхньої експлуатації з пошкодженою ізоляцією;

– не тягнути за мережевий кабель, щоб витягти вилку з розетки;

– не закривати меблями, різноманітним інвентарем вимикачі, штепсельні розетки;

– не підключати одночасно декілька потужних електропристроїв до однієї розетки, що може викликати надмірне нагрівання провідників, руйнування їхньої ізоляції, розплавлення і загоряння полімерних матеріалів;

– не залишати включені електроприлади без нагляду;

– не допускати потрапляння всередину електроприладів крізь вентиляційні отвори рідин або металевих предметів, а також не закривати їх та підтримувати в належній чистоті, щоб уникнути перегрівання та займання приладу;

– не ставити на електроприлади матеріали, які можуть під дією теплоти, що виділяється, загорітися (канцелярські товари, сувенірну продукцію тощо).

#### 4.6 Техніка безпеки при проведенні науково-дослідницьких робіт

##### 4.6.1 Вимоги безпеки під час виконання експериментів

У лабораторіях кафедри устаткування хімічних підприємств **ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ:**

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

- торкатися до струмопровідних частин установок, електроприводів, електропроводів і кабелів;

- торкатися до рухомих частин випробувальних машин і лабораторних установок;
- відгвинчувати, загвинчувати вентилі, рукоятки, маховики, сигнальні лампи, електрозапобіжники лабораторного устаткування;
- збірка і розбирання установок, що знаходяться під електронапругою;
- залишати працюючі (включені) установки без нагляду;
- знаходитися в лабораторіях у верхньому одязі, складати верхній одяг на лабораторному устаткуванні;
- захарашувати проходи між лабораторними установками особистими речами (портфелями, сумками);
- знімати захищаючі кожухи деталей або електричних пускорегулюючих пристроїв, що обертаються.
- у приміщеннях лабораторій забороняється приймати їжу.

#### 4.6.2 Вимоги безпеки перед початком роботи

- перед початком роботи необхідно надіти спецодяг;
- перевірити з'єднання електроустаткування з контуром захисного заземлення, його справність, полягання інструменту, автоматичних вимикачів, розеток, вилок, освітлення, а також наявність первинних засобів пожежогасіння;
- при експлуатації електроустаткування необхідно суворо керуватися правилами, висловленими в техпаспорті;
- при виявленні несправностей електроустаткування, приладів, стендів, захисного заземлення негайно повідомити про це зав. кафедрою або зав. лабораторією.

#### 4.6.3 Вимоги безпеки під час виконання роботи

- студентам дозволяється працювати тільки на справному електроустаткуванні;
- відключення від мережі проводити, тільки узявшись за роз'єм, вилку або фішку щоб уникнути короткого замикання і можливого при цьому нещасного випадку;
- забороняється виймати штепсельні роз'єми, вилки, фішки, узявшись за дріт;

- забороняється працювати на електроустаткуванні у вологому одязі, вологими руками;
- забороняється залишати без нагляду, ремонтувати і переносити включене в мережу електроустаткування;
- забороняється підключати декілька споживачів електричної енергії до однієї штепсельної розетки щоб уникнути перевантаження електричної мережі і виникнення загоряння;
- забороняється заміна запобіжників, що перегоріли, "жучками". Необхідно застосовувати тільки запобіжники заводського виготовлення, що калібруються;
- забороняється захарашувати підступи до електричних пристроїв, шафам, автоматичним вимикачам, розеткам, а також відкривати їх;
- при раптовому припиненні подачі електроенергії всі вимикачі і важелі повинні бути негайно вимкнені;
- не допускається залишати неізольованими оголені дроти, перенавантажувати електромережу, користуватися розбитими вилками, розетками, вимикачами;
- роботи по ремонту апаратури і проведення експериментів на відкритих схемах з небезпечною для життя напругою виконувати тільки удвох;
- робоче місце тримати в сухому і чистому стані;
- 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;
- приступати до роботи дозволяється тільки після усунення помічених несправностей електроустаткування, вимірювальних приладів і стендів.

#### 4.6.4 Вимоги безпеки після закінчення роботи

- після закінчення роботи вимкнути електроприлади, відключити від мережі лабораторні стенди;
- вимкнути всі автоматичні вимикачі, відключити подовжувачі мережі 220 V, що використовуються;
- один раз в квартал проводити очищення від пилу і бруду за допомогою



пилососа або щітки вузлів персональних комп'ютерів;

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

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

- при відході з приміщення необхідно вимкнути всі споживачі електроенергії;

- привести в порядок робоче місце;

- здати ключі від лабораторії на вахту.

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

## 5 ВИСНОВКИ

1. Проведено гідродинамічне моделювання тарілок провального типу. Розроблено колону ректифікації суміші нітратна кислот-ортофосфорна кислота потужністю 10 тис. т/рік.

2. На розрахунок меж режимів роботи тарілок провального типу значно впливає діаметр отворів, тому необхідні дослідження з метою вдосконалення методики розрахунку тарілок провального типу.

3. За допомогою рівняння (3.33) можна здійснювати гідродинамічне моделювання роботи тарілок провального типу.

4. Показаний приклад розрахунку швидкості газу в точці біфуркації тарілок провального типу з діаметром  $D = 1$  м, з використанням даних отриманих при дослідженні тарілок провального типу в колоні з діаметром  $D = 0,057$  м.

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

6. Проведені в роботі дослідження підтвердили розрахункові дані. При щільності зрошення  $L = 2,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ год})$ , в колоні діаметром  $D = 0,057$  м, швидкість повітря в точці біфуркації склала  $w = 1,0$  м/с. Вільний переріз тарілки становив  $f = 0,16$ .

7. Таким чином можна здійснювати гідродинамічне моделювання газорідного шару на дірчатих тарілках провального типу великого діаметру ( $D=1$ м), використовуючи експериментальні дані отримані на колоні діаметром модельного розміру ( $D = 0,057$  м)

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

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 ацетонобутиловых 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 ацетонобутиловой 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

27. Закон України «Про охорону праці».

28. Кодекс законів України про працю.

29. Закон України "Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності".

30. НПАОП 0.00-6.03-93 «Порядок опрацювання та затвердження власником нормативних актів про охорону праці, що діють на підприємстві».

31. НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

32. НАПБ Б.02.005-2003 «Типове положення про інструктажі, спеціальне навчання та перевірку знань з питань пожежної безпеки на підприємствах, в установах та організаціях України».

33. НПАОП 0.00-4.15-98 «Положення про розробку інструкцій з охорони праці».

34. ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень».

35. ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин».

36. НПАОП 0.00.-1.28-10 «Правил охорони праці під час експлуатації

електронно-обчислювальних машин».

37. НАПБ Б.03.002-2007. «Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою».

38. ГОСТ 12.1.044-89 ССБТ. «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения».

39. ДСН 3.3.6.042-99. «Санітарні норми мікроклімату виробничих».

40. ДБН-В.2.5-28-2006. «Природне і штучне освітлення».

41. ДСН 3.3.6.037-99. «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку».

42. ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».

43. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища».

44. Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення».

45. Закон України «Про відходи».

46. Закон України «Про охорону атмосферного повітря».

47. Закон України «Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру».

48. ДСанПіН 2.2.7.029. «Гігієнічні вимоги щодо поводження з промисловими відходами та визначення їх класу небезпеки для здоров'я населення».

49. Закон України «Про металобрухт».

50. ДСТУ 3911-99. Охорона природи. Поводження з відходами. Виявлення відходів і подання інформаційних даних про відходи. Загальні вимоги.

51. ДК 005-96 Державний класифікатор України. Класифікатор відходів.

52. ДСН 3.3.6.039-99 Санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.

53. ДСТУ ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования.

54. ДБН В.2.5-28:2015 Природне і штучне освітлення.

55. Кодекс. Водний кодекс України.

56. ДСанПіН 2.2.7.029. Гігієнічні вимоги щодо поводження з промисловими

відходами та визначення їх класу небезпеки для здоров'я населення.

57. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони.

58. ДСТУ ISO 1A001:2006 (ISO 1A001:200A). Системы экологического управления. Требования и руководящие указаний по применению.