

СТУДЕНТСЬКА НАУКОВА РОБОТА

АБСОРБЕРИ ПІДГОТОВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ: ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВИХРОВИХ ТАРІЛОК З ПРОТИТЕЧІЙНИМ РУХОМ ПОТОКІВ

ДЕВІЗ „МАСООБМІННО-СЕПАРАЦІЙНИЙ ПРИСТРІЙ”

<b>ЗМІСТ</b>	<b>с.</b>
ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ	4
1.1 Сучасні способи підвищення ефективності масообмінних контактних елементів з високотурбулізованими потоками	4
1.2 Висновки до першого розділу	5
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБШРУНТУВАННЯ ВПЛИВУ ГІДРОДИНАМІЧНИХ І КОНСТРУКТИВНИХ ЧИННИКІВ НА РОЗМІРИ МАСООБМІННО-СЕПАРАЦІЙНОГО ЕЛЕМЕНТА	6
2.1 Визначення висоти та радіуса масообмінно-сепараційного елемента	6
2.2 Моделювання руху газового потоку і плівки рідини в масообмінно-сепараційному елементі	18
2.3 Визначення конструктивних розмірів вузлів підведення та відведення рідини	21
2.4 Висновки до другого розділу	23
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ РІДИНИ І ГАЗОВОГО ПОТОКУ В МЕЖАХ КОНТАКТНОЇ СТУПЕНІ	24
3.1 Опис експериментального стенду, мета проведення експерименту	24
3.2 Дослідження поведінки рідини на полотні контактної ступені	25
3.3 Визначення меж існування оптимального режиму роботи контактної пристрою та переходу до режиму винесення рідини	27
3.4 Висновки до третього розділу	28
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	29
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	30

## ВСТУП

Від ефективності процесів підготовки природного газу до подальшої переробки залежить якість товарного продукту. Абсорбційні методи підготовки природного газу, які використовуються в сучасних схемах газопереробних заводів, постійно удосконалюються як технологічно, так і конструктивно. У зв'язку з великою різноманітністю конструкцій контактних пристроїв колонних апаратів важливим завданням є обрання такої контактної ступені, яка б дозволила отримати максимальну ефективність проведення абсорбції при розвиненій поверхні контакту фаз та мінімальних затратах на її виготовлення. Дослідження розробок вчених в цій галузі показало, що використанні вихрових контактних пристроїв дозволяє значно знизити бризковинесення рідини, зменшити гідравлічний опір та збільшити поверхню контакту фаз.

Метою роботи є визначення оптимальних конструктивних розмірів прямоотечійно-відцентрового масообмінно-сепараційного контактного пристрою залежно від гідродинамічних та технологічних факторів.

Завдання роботи:

- 1) визначення сил, що діють на патрубков та теоретичне обґрунтування впливу гідродинамічних конструктивних параметрів на розміри масообмінно-сепараційного елемента;
- 2) моделювання руху газового потоку і плівки рідини в масообмінно-сепараційному елементі;
- 3) експериментальне дослідження руху рідини і газового потоку в межах контактної ступені.

Наукова новизна одержаних результатів:

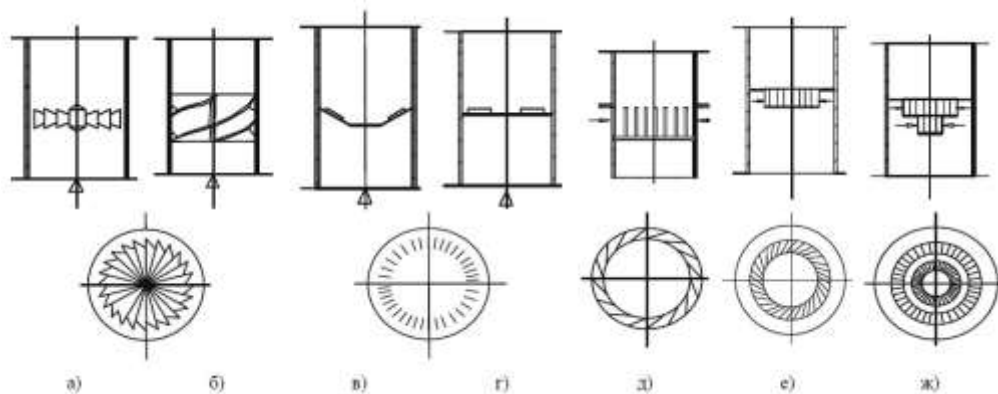
- за результатами аналізу факторів силового впливу на плівку рідини визначено основні конструктивні прямоотечійно-відцентрового елемента;
- описано гідродинамічну картину руху однофазного та двофазного потоків в прямоотечійно-відцентровому елементі;
- виявлено діапазон існування оптимального режиму контакту фаз в межах прямоотечійно-відцентрового елемента та встановлено характер руху рідини на полотні вихрової тарілки.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 1.1 Сучасні способи підвищення ефективності масообмінних контактних елементів з високотурбулізованими потоками

Із усього різноманіття вихрових контактних ступенів [1], представлених на рисунку 1.1, для колонних апаратів найбільш перспективними є контактні ступені з тангенціальними і багатолопатевиими осьовими завихрювачами [1].

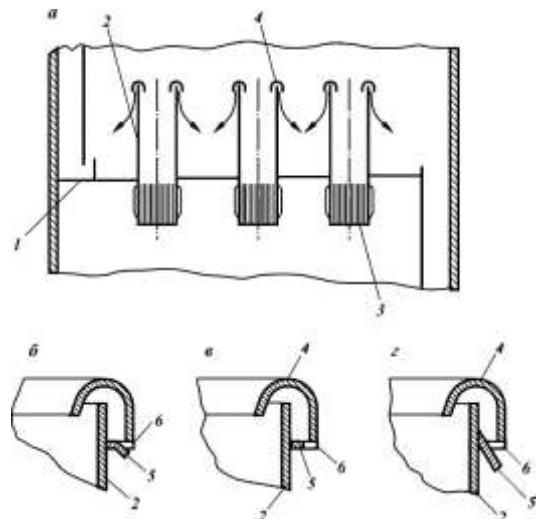


**Рисунок 1.1 - Схеми вихрових контактних ступенів з різними типами завихрювачів: а – лопатевий; б – стрічковий; в, г – осьові багатолопатеві; д-ж – тангенціальні**

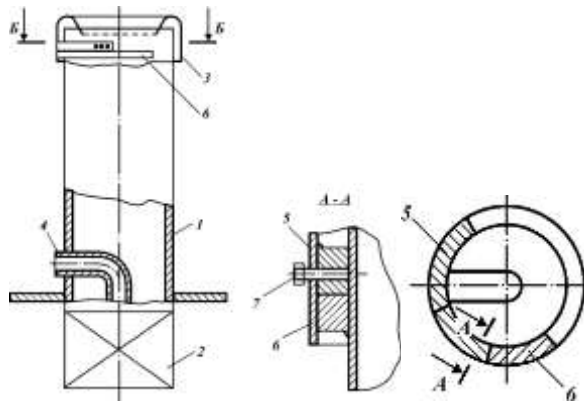
#### Рисунок 1.2 – Масообмінна тарілка

а - тарілка; б - кільцева перегородка з відігнутим кінцем; в - варіант перегородки, розташованої під кутом  $90^\circ$  до патрубку; г - варіант перегородки, встановленої під гострим кутом до патрубку.

1 - полотно; 2 - патрубок; 3 - завихрювач; 4 – плівкоз'ємник; 5 - перегородка; 6 - виступи



Масообмінна тарілка (рисунок 1.2) відноситься до контактних пристроїв для проведення тепломасообміну на установках осушення газу, переробки попутного нафтового газу [2].



**Рисунок 1.3 - Прямотечійно-відцентровий елемент**

**1-патрубок; 2 - завихрювач; 3 - плівкоз'ємник; 4 - трубка для подачі рідини; 5, 6-кільцеві сектори; 7-фіксатор**

Дане технічне рішення дозволяє зменшити кількість контактних елементів, а тим самим діаметр апарату, що, у свою чергу, дозволяє понизити металоемність обладнання. Крім того, підвищується ефективність і продуктивність за рахунок зниження вторинного унесення рідини газовим потоком.

Прямотечійно-відцентровий елемент

Прямотечійно-відцентровий елемент (рисунок 1.3) відноситься до контактних і сепараційних пристроїв та може бути використаний для розділення газорідинної суміші в сепараторах і колонах газової, хімічної і нафтохімічної промисловості [2].

Застосування запропонованого технічного рішення дозволяє розширити діапазон ефективної роботи прямоточно-відцентрових елементів і збільшити ефективність розділення газової і рідкої фаз за рахунок забезпечення можливості регулювання живого перерізу вихідного каналу для рідини.

## **1.2 Висновки до першого розділу**

Питання щодо визначення основних розмірів вихрових контактних елементів в науковій літературі висвітлене недостатньо, тому актуальними є дослідження з визначення оптимальних конструктивних розмірів прямоотечійно-відцентрового масообмінно-сепараційного контактного пристрою та руху рідини і газового потоку в межах контактної ступені.

## **2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВПЛИВУ ГІДРОДИНАМІЧНИХ І КОНСТРУКТИВНИХ ЧИННИКІВ НА РОЗМІРИ МАСООБМІННО-СЕПАРАЦІЙНОГО ЕЛЕМЕНТА**

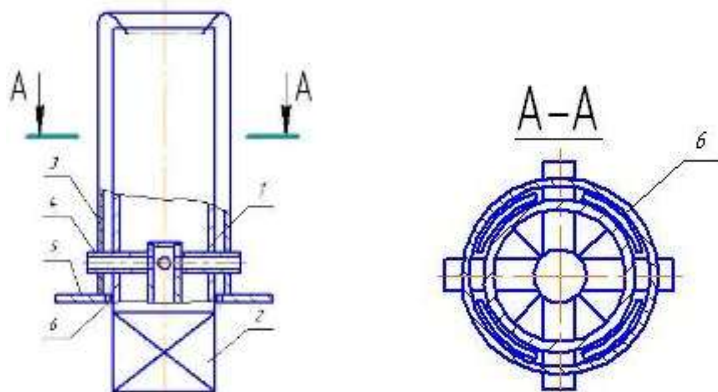
### **2.1 Визначення висоти та радіуса масообмінно-сепараційного елемента**

При теоретичному та експериментальному дослідженні характеру руху фаз в межах вихрових масообмінно-сепараційних контактних пристроїв актуальним завданням залишається вирішення питання щодо підбору оптимальної конструкції та розмірів масообмінно-сепараційного елемента. Конфігурація та розміри масообмінно-сепараційного патрубка в значній мірі впливають на закономірності створення поверхні контакту фаз, бризкоунесення, гідравлічний опір тарілки. З іншого боку від конструкції масообмінно-сепараційного елемента залежать матеріальні витрати. Тому дуже важливо дослідити оптимальні конструктивні параметри патрубка, які б дозволили отримати рівномірний розподіл рідини при контакті з газовим потоком, створити однорідну плівку, визначити оптимальну швидкість руху газового потоку, створити максимальну поверхню контакту фаз і т.д.

Принцип дії прямотечійно-відцентрового елемента наведено на рисунку 2.1. Потік газу поступає в патрубок 1 через завихрювач 2, де набуває закрученого руху. За рахунок розрідження, яке виникає в центральній частині закрученого потоку, з полотна тарілки через трубку 4 відбувається підсмоктування рідини в патрубок 1, де рідина, змішуючись з газом, контактує з ним. Під дією відцентрової сили та виштовхувальної сили закручений газорідинний потік піднімається вздовж осі патрубка і розділяється. Газ відділяється від рідини і виходить закрученим потоком через центральний отвір патрубка 1, а рідина відкидається до стінок патрубка 1, і, піднімаючись догори, виходить з патрубка 1 через щілину між циліндричним патрубком 1 і плівкознімачем 3 [3].

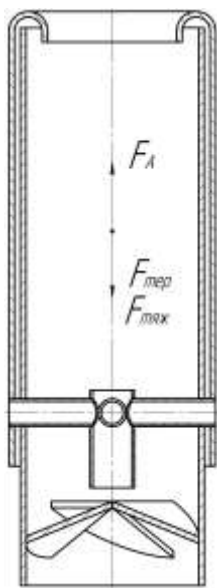
Аналізуючи конструкцію і принципи дії масообмінно-сепараційного елемента вихрової контактної ступені, стає можливим теоретичне обґрунтування його оптимальних діаметра та висоти для забезпечення наступних умов:

1) рівномірний розподіл плівки рідини по внутрішній поверхні масообмінно-сепараційного елемента; 2) рівномірний контакт газового потоку з плівкою рідини; 3) мінімальне бризковинесення з меж контактної ступені.



**Рисунок 2.1 – Конструкція проточечно-відцентрового елемента**  
**1 – патрубок; 2 – завихрювач; 3 – плівкознімач; 4 – трубка для подачі рідини, 5 – контактна тарілка; 6 – отвори для зливання рідини.**

В загальному випадку на плівку рідини, яка рухається по внутрішній поверхні масообмінно-сепараційного елемента під дією висхідного газового потоку, діють сила тяжіння, сила тертя між плівкою рідини та внутрішньою стінкою патрубка і сила аеродинамічного опору висхідному газовому потоку (рисунок 2.2).



**Рисунок 2.2 – Сили, що діють на рідину висхідному русі газового потоку**

Залежно від висхідної складової швидкості руху газового потоку, від якої залежить сила аеродинамічного опору, при русі рідини по внутрішній поверхні масообмінно-сепараційного елемента спостерігаються такі випадки [6]:

1) при низьких значеннях висхідної складової швидкості руху газового потоку сума сил тяжіння і тертя більша за аеродинамічну силу – в контактному патрубку створюється така гідродинамічна ситуація, при якій плівка рідини не розподіляється рівномірно по його внутрішній поверхні, рідина надходить в нижню частину контактної трубки та відводиться через нижній його переріз фактично без контакту з газовою фазою. В такому випадку різко

зменшується поверхня контакту фаз та рівномірність розподілу рідини по внутрішній поверхні контактної трубки (рисунки 2.3, а);

2) при високих значеннях висхідної складової швидкості руху газового потоку сума сил тертя і тяжіння менша за аеродинамічну силу – відбувається відрив плівки рідини з внутрішньої поверхні контактної трубки, значно збільшується бризковинесення рідини з контактної ступені (рисунки 2.3, б).



а)

б)

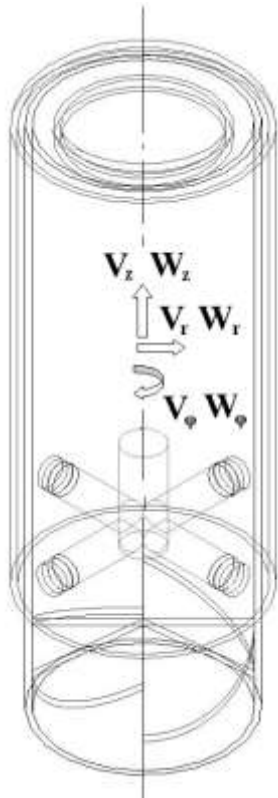
**Рисунок 2.3 – Поведінка рідини залежно від висхідної складової швидкості руху газового потоку: а – випадок 1; б – випадок 2**

Отже, оптимальна висота прямооточійно-відцентрового елемента визначається з балансу вказаних сил; при цьому забезпечується максимальна поверхня контакту фаз та мінімальне бризковинесення з контактної ступені.

Оптимальний діаметр масообмінно-сепараційного елемента повинен забезпечувати максимальне значення висхідної складової швидкості руху газового потоку, при якій виконується умова балансу сил.

При використанні в конструкції контактної трубки пристрою для завихрення газового потоку гідродинамічна і силова картина руху плівки рідини змінюється. Утворені вихрові потоки всередині контактної трубки призводять до виникнення відцентрової сили. Сила, діючи на рідину всередині трубки, притискає її до стінок і таким чином створюється шар тонкої плівки. При цьому плівка одночасно рухається до верхнього перерізу контактної трубки. В разі, якщо сила аеродинамічного опору перевищує відцентрову силу, сили тертя і тяжіння, рідина досягає верхнього перерізу контактної трубки і відводиться через плівкознімач. Умовою мінімального бризковинесення рідини є баланс зазначених сил.





Таким чином, кожна зі складових повної швидкості закрученого газового потоку сприяє руху плівки рідини у відповідному напрямку за законом збереження моменту кількості руху для двофазного потоку (рисунок 2.4) [6].

**Рисунок 2.4 – Складові повної швидкості руху закрученого газового потоку і плівки рідини:  $V_r, V_z, V_\varphi$  - радіальна, висхідна та колова складові швидкості руху газу, м/с;  $W_r, W_z, W_\varphi$  - радіальна, висхідна та колова складові швидкості руху плівки рідини, м/с.**

Силовий вплив на плівку рідини при її контакті з вихровим газовим потоком зображений на рисунку 2.5.

Визначимо сили, які діють на плівку рідини у вихровому газовому потоці: сила тяжіння  $F_{\text{об.г}}$ ; відцентрова сила  $N$ ; сила тертя  $F_{\text{об.г}}$ ; сила, під дією якої, рідина піднімається догори патрубку  $P$ ; гідростатична сила  $P_r$ .

1) Сила тяжіння, яка сприяє руху рідини до нижнього перерізу контактної патрубку:

$$F_{\text{тяж}} = m \cdot g$$

де  $m$  – маса рідини кг;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

2) Відцентрова сила згідно закону Ньютона:

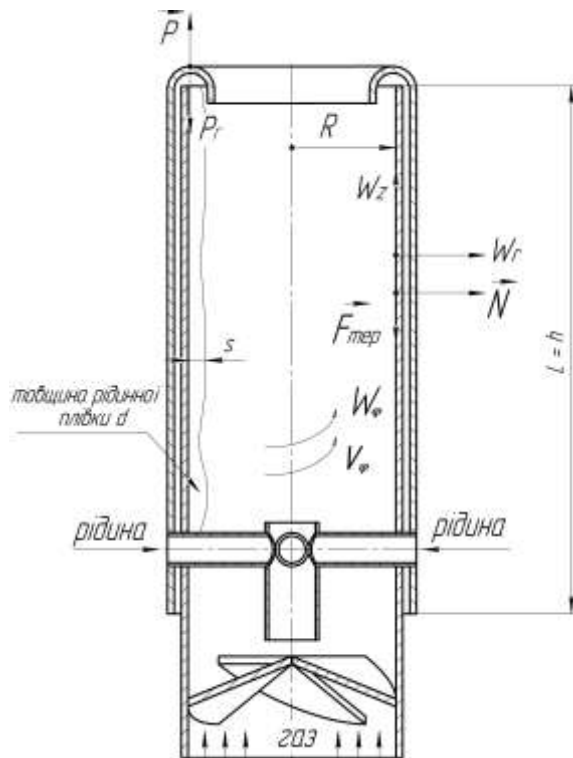
$$\vec{N} = m \cdot \vec{a}_n$$

де  $m$  – маса рідини, кг, яке визначається за формулою:

$$m = D \cdot L \cdot \pi \cdot R^2, \text{ кг}$$

де  $D$  – частка об'єму, яка зайнята рідиною,  $\hat{e} \tilde{a} / \hat{i}^3$ ;  $L$  – довжина патрубку, м;  $R$  – радіус патрубку, м;  $\vec{a}_n$  - нормальне прискорення, м/с<sup>2</sup>, яке визначається за формулою:

$$\hat{a}_n = \frac{W_r^2}{R},$$



де  $W_r$  - швидкість рідини висхідна, м/с;  $R$  – радіус патрубку, м;

**Рисунок 2.5 – Силовий вплив на плівку рідини при її контакті з вихровим газовим потоком**

Тоді сила реакції стінки:

$$|\vec{N}| = \frac{m \cdot W_r^2}{R}$$

3) Сила тертя згідно закону в'язкого тертя Ньютона:

$$|\vec{F}_{\text{об}}| = \eta \cdot \frac{W_z}{s}$$

де  $\eta$  - коефіцієнт в'язкого тертя;  $W_z$

- швидкість рідини тангенціальна, м/с;  $s$  – товщина рідинної плівки, м.

4) Сила, з якою рідина піднімається догори патрубку. Користуючись законом збереження імпульсу:

$$d(m\vec{v}^2) = \vec{P} \cdot dt$$

$$|\vec{P}| = \frac{d(mv)}{dt} = 2 \cdot W_z \cdot \frac{dm}{dt}$$

$$\frac{dm}{dt} = W_z \cdot 2\pi R d\rho$$

Отже:

$$|\vec{P}| = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot s \cdot \rho \cdot W_z^2$$

де  $\rho$  - густина рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;  $s$  – товщина плівки рідини, м.

Сила, з якою потік рідини піднімається догори патрубку ( $P$ ) урівноважується силою гідростатичною  $P_a$ . Якщо сила виштовхуюча буде більшою за гідростатичну силу, то рідина буде підніматися вгору, при цьому важливе значення цієї сили, воно повинне бути достатнім для того, щоб рідина зливалася через плівкознімач, при цьому не викликаючи значного бризковинесення. Якщо ж навпаки, то сили  $P$  недостатньо для того, щоб плівка рідини під-

нялася до плівкознімача, при цьому рідина виводиться через нижній переріз патрубку без контакту з газовим потоком. Тому важливо збалансувати сили гідростатичну та виштовхуючу.

5) Гідростатична сила. За законом Паскаля:

$$P_a = \rho gh$$

Якщо записати, що  $dV = dF \cdot s$  и  $dV = dm/\rho$ , при цьому  $dF = dm/\rho \cdot s$  то  $P = dm/dF$ .

Підставляємо отримане відношення в формулу закону Паскаля, та виражаємо висоту патрубка:

$$h = \frac{1}{\rho \cdot g} \cdot \frac{dN}{dF} = \frac{1}{\rho \cdot g} \cdot \frac{dN}{dm} \cdot \rho \cdot s = \frac{s}{g} \cdot \frac{dN}{dm}$$

Як зазначено вище,  $\frac{dN}{dm} = \frac{v^2}{R}$ . Тоді остаточно висота патрубка:

$$h = \frac{s}{g} \cdot \frac{W_\phi^2}{R}, \text{ м}$$

де  $W_\phi$  – швидкість закручення потоку, м/с;  $s$  - товщина плівки рідини, м

Товщина рідинної плівки:

$$s = \frac{m}{2\pi \cdot L \cdot \rho \cdot R} = \frac{D \cdot L \cdot \pi \cdot R^2}{2\pi \cdot L \cdot \rho \cdot R}$$

Тоді:

$$s = \frac{1}{2} \cdot \frac{D \cdot R}{\rho}, \text{ м}$$

де  $D$  – частка об'єму, зайнята рідиною.

Даний параметр характеризується як відношення ваги рідини в одному патрубку до об'єму патрубка.

$$D = \frac{m_{\text{рід}}}{V_{\text{пат}}}, \text{ г/л}^3$$

Об'єм патрубка:

$$V_{\text{пат}} = \frac{\pi \cdot (d_{\text{пат}})^2}{4} \cdot h_{\text{пат}}, \text{ л}^3$$

де  $\frac{\pi \cdot (d_{\text{áf}}^{\text{íàòð}})^2}{4}$  - площа патрубку,  $\text{ì}^2$ ;  $h_{\text{íàòð}}$  - висота патрубку, м.

Вага рідини в одному патрубку:

$$m_{\text{ò³à}} = \frac{m_{\text{ò³àí}}}{n}, \text{ кг}$$

де  $m_{\text{ò³àí}}$  - маса рідини на полотні контактної пристрою, кг

$n$  – число патрубків на полотні контактної пристрою.

$$m_{\text{ò³àí}} = V_{\text{ò³à}} \cdot \rho, \text{ кг}$$

де  $V_{\text{ò³à}}$  - об'єм рідини на полотні контактної пристрою,  $\text{м}^3$

$$V_{\text{ò³à}} = F_{\text{ò³à}} \cdot h_{\text{ò³à}}$$

де  $F_{\text{ò³à}}$  - площа поверхні, заповнена рідиною,  $\text{ì}^2$

$h_{\text{ò³à}}$  - висота шару рідини на полотні контактної патрубку, м.

Знайдемо площу поверхні, яка заповнена рідиною:

$$F_{\text{ò³à}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{áf}}^2}{4} - \frac{\pi \cdot (d_{\text{í}}^{\text{íàòð}})^2}{4} \cdot n, \text{ì}^2$$

де  $\frac{\pi \cdot D_{\text{áf}}^2}{4}$  - площа поверхні контактної пристрою,  $\text{ì}^2$ , де  $D_{\text{áf}}$  - внутрішній ді-

аметр контактної пристрою, м;  $\frac{\pi \cdot (d_{\text{í}}^{\text{íàòð}})^2}{4} \cdot n$  - площа поверхні, яку займають па-

трубки,  $\text{ì}^2$ , де  $d_{\text{í}}^{\text{íàòð}}$  - зовнішній діаметр одного патрубку,  $n$  – кількість патрубків.

Висота шару рідини (за результатами експерименту, розділ 3)

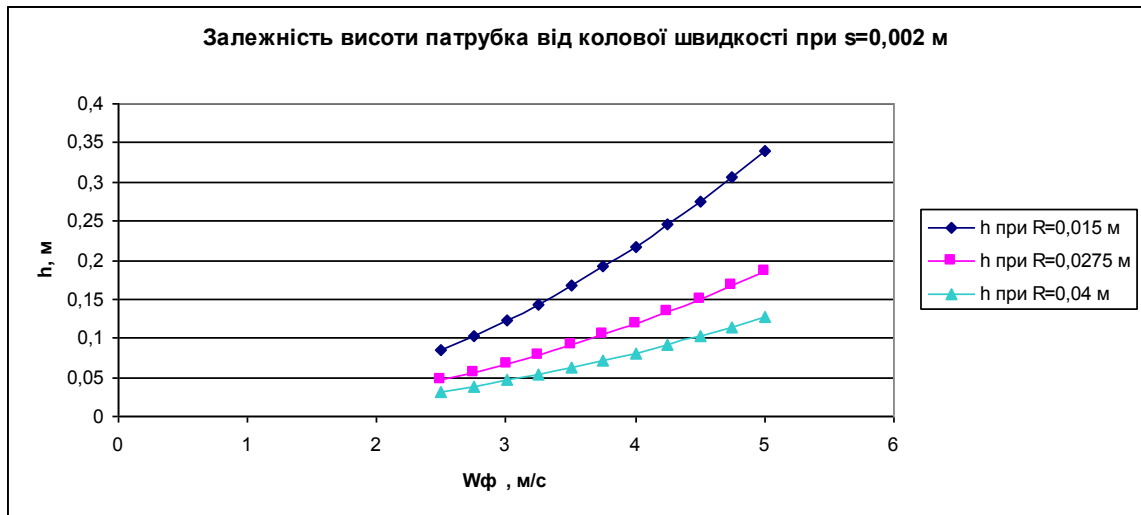
$$h_{\text{ò³à}} = 0,5 \cdot h_{\text{íàòð}}.$$

На основі одержаної теоретичної залежності проводимо аналіз впливу гідродинамічних та конструктивних параметрів на висоту прямотечійно-відцентрового елемента.

1. Залежність висоти патрубку від колової складової повної швидкості плівки рідини (кута нахилу лопатей пристрою для завихрення газового потоку).

Аналіз одержаних графічних залежностей (рисунок 2.6) демонструє, що зі збільшенням колової швидкості руху газового потоку при постійній величині товщини плівки рідини відбувається монотонне зростання висоти па-

трубка. Це пояснюється тим, що відбувається збільшення значення сили, яка притискає плівку рідини до стінки, зростає інтенсивність її закрутки, що потребує більшої висоти патрубку для уникнення небажаного бризковинесення з контактної ступені. При цьому необхідно враховувати, що зі збільшенням ступеня закрутки газового потоку рідина буде розподілятися по внутрішній поверхні патрубка рівномірніше.



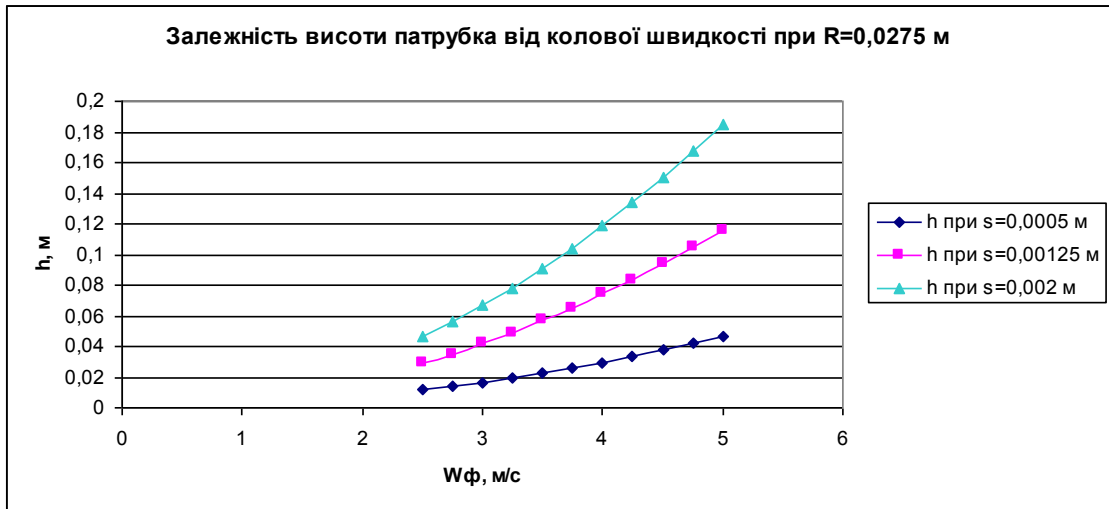
**Рисунок 2.6 – Залежність висоти патрубка від колової складової повної швидкості плівки рідини при постійній товщині плівки**

З наведених графічних залежностей видно, що зі зменшенням радіуса патрубка зростання висоти патрубка проходить з більшим приростом. Це пояснюється тим, що зі зменшенням перерізу патрубка збільшується значення висхідної складової повної швидкості руху газового потоку, і, як наслідок, виштовхувальної сили, що призводить до більш інтенсивного бризковинесення.

Аналіз одержаних графічних залежностей (рисунок 2.7) демонструє, що зі збільшенням колової швидкості руху газового потоку при постійній величині радіуса контактної патрубка відбувається монотонне зростання висоти патрубка.

Це пояснюється тим, що зі збільшенням навантаження по рідкій фазі та збільшенні товщини плівки рідини закручення газового потоку сприяє збільшенню бризковинесення за рахунок того, що відбувається відрив шару плівки від стінки. При цьому необхідно збільшувати висоту контактної патрубка для перешкодження підвищеного бризковинесення рідини. Зростання

приросту у висоті контактного патрубка зі збільшенням товщини плівки рідини пояснюється збільшенням кількості рідини, яка може виноситись з меж контактної ступені.



**Рисунок 2.7 - Залежність висоти патрубка від колової складової повної швидкості плівки рідини при постійному радіусі патрубка**

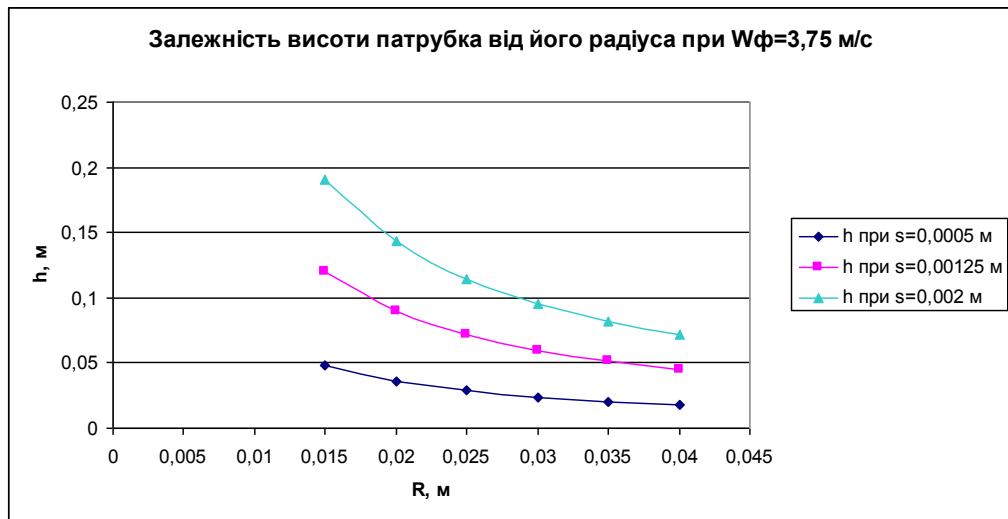
## 2. Залежність висоти патрубка від радіуса патрубка

Аналіз одержаних графічних залежностей (рисунок 2.8) демонструє, що зі збільшенням радіуса контактного патрубка при постійному значенні колової швидкості руху плівки рідини та змінній товщині плівки рідини відбувається зменшення висоти контактного патрубка, що пояснюється збільшенням відцентрової сили, яка діє на рідину всередині патрубка та зменшенням значення виштовхувальної сили, яка діє на плівку рідини. Збільшення колової швидкості руху плівки рідини сприяє більш рівномірному розподілу рідини по внутрішній поверхні контактного патрубка та зменшенню бризковинесення з контактної ступені.

Більший приріст зменшення висоти контактного патрубка при збільшенні товщини плівки рідини пояснюється тим, що збільшується значення сили, яка сприяє руху плівки до нижнього перерізу контактного патрубка, зменшуючи цим самим бризковинесення.

При постійному значенні товщини плівки рідини та збільшенні колової швидкості руху плівки спостерігається монотонне зниження висоти контактного патрубка (рисунок 2.9) з різною інтенсивністю залежно від колової

швидкості руху плівки, що пояснюється збільшенням сили, яка притискає плівку рідини до внутрішньої поверхні контактної трубки і перешкоджає підвищеному бризковинесенню.



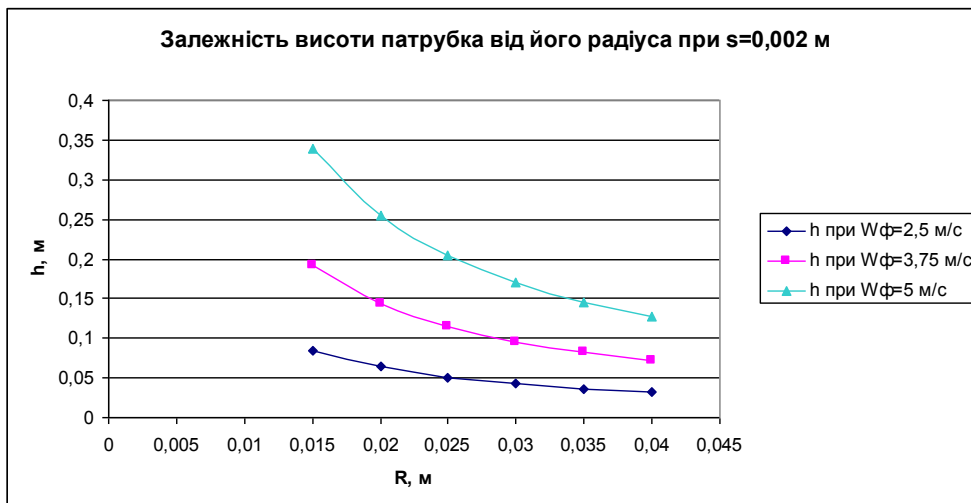
**Рисунок 2.8 – Залежність висоти патрубка від радіуса патрубка при постійній колій складовій повної швидкості плівки рідини**

### 3. Залежність висоти патрубка від товщини плівки рідини

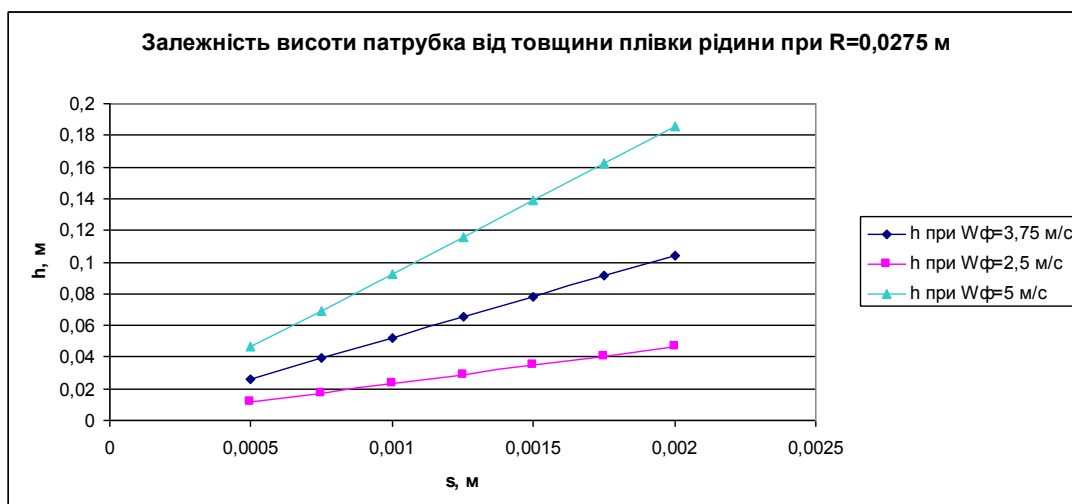
Аналіз одержаних графічних залежностей (рисунок 2.10) демонструє, що зі збільшенням товщини плівки рідини при постійному значенні радіуса патрубка та змінній колій швидкості плівки рідини, відбувається збільшення висоти патрубка. Збільшення колій швидкості і товщини плівки рідини призводить до інтенсивного закручування газового потоку, що сприяє збільшенню бризковинесення. Для зменшення бризковинесення необхідно збільшувати висоту патрубка.

Аналіз одержаних графічних залежностей (рисунок 2.11) демонструє, що зі збільшенням товщини плівки рідини при постійному значенні колій швидкості плівки рідини та змінному радіусі патрубка, висота патрубка збільшується.

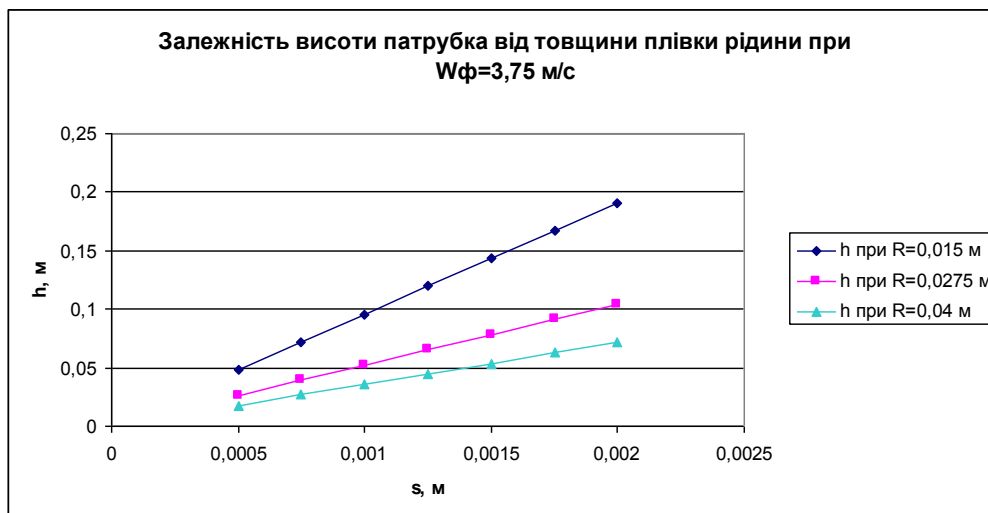
Це пояснюється тим, що зі збільшенням відцентрової сили, збільшується товщина плівки і зменшується виштовхуюча сила, при цьому переріз максимальний, висхідний потік мінімальний. При зменшенні перерізу збільшується значення висхідної швидкості газового потоку і виштовхувальної сили. Це призводить до бризковинесення, і як наслідок, необхідно збільшувати висоту патрубка.



**Рисунок 2.9 – Залежність висоти патрубку від радіуса патрубку при постійній товщині плівки рідини**



**Рисунок 2.10 – Залежність висоти патрубку від товщини плівки рідини при постійному радіусі патрубку**



**Рисунок 2.11 – Залежність висоти патрубку від товщини плівки рідини при постійній колівій складовій повної швидкості плівки рідини**



#### 4. Залежність товщини плівки рідини від радіуса та об'єму, який займає рідина

Аналіз одержаних графічних залежностей (рисунки 2.12, 2.13) демонструє, що зі збільшенням об'єму, що займає рідина всередині патрубку, збільшується товщина плівки. Це пов'язано з тим, що зі збільшенням об'єму контактного патрубка (в квадратичній залежності від радіуса контактного патрубка) зростання його внутрішньої поверхні проходить лінійно від радіусу; у такому випадку при зростанні об'єму рідини у патрубці товщина плівки рідини збільшується.

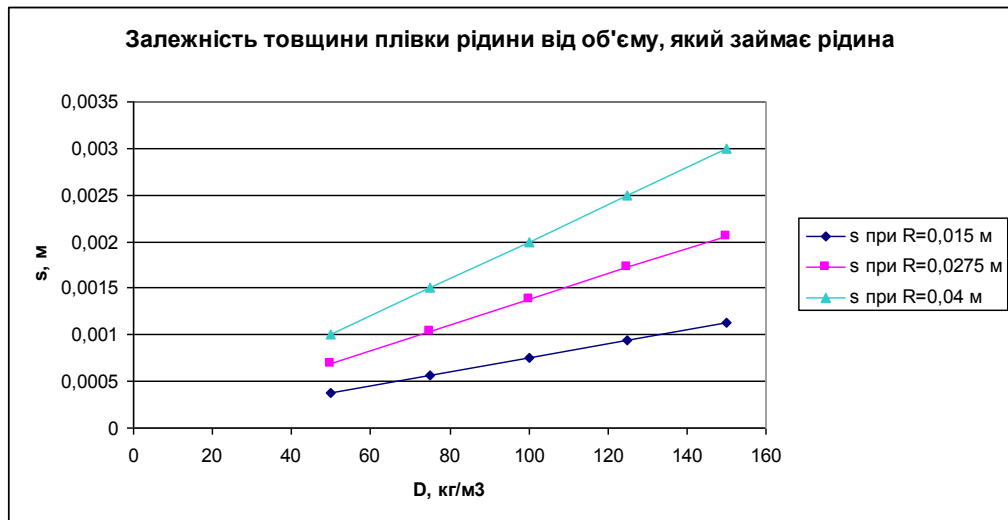


Рисунок 2.12 – Залежність товщини плівки рідини від об'єму, що займає рідина

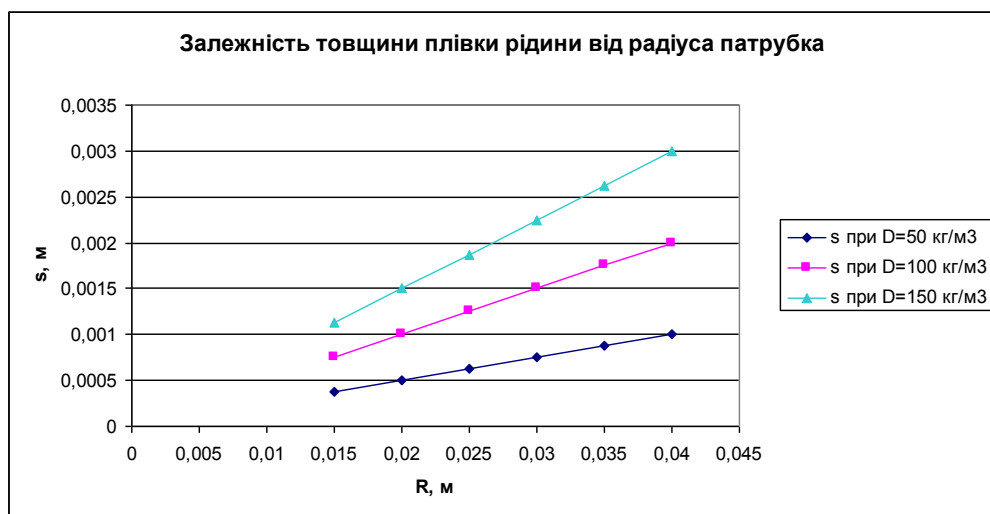
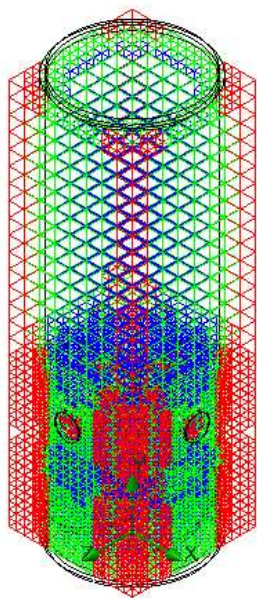


Рисунок 2.13 – Залежність товщини плівки рідини від радіуса патрубка

## 2.2 Моделювання руху газового потоку і плівки рідини в масообмінно-сепараційному елементі

Моделювання руху потоків за допомогою програмних продуктів COSMOS FlowWorks, та Flow Vision базується на методі вирішення рівнянь гідродинаміки за допомогою методу кінцевих об'ємів і використанні прямокутної адаптивної сітки з локальним подрібненням

(рисунок 2.14).



**Рисунок 2.14 – Розрахункова сітка прямокутної-відцентрового елемента**

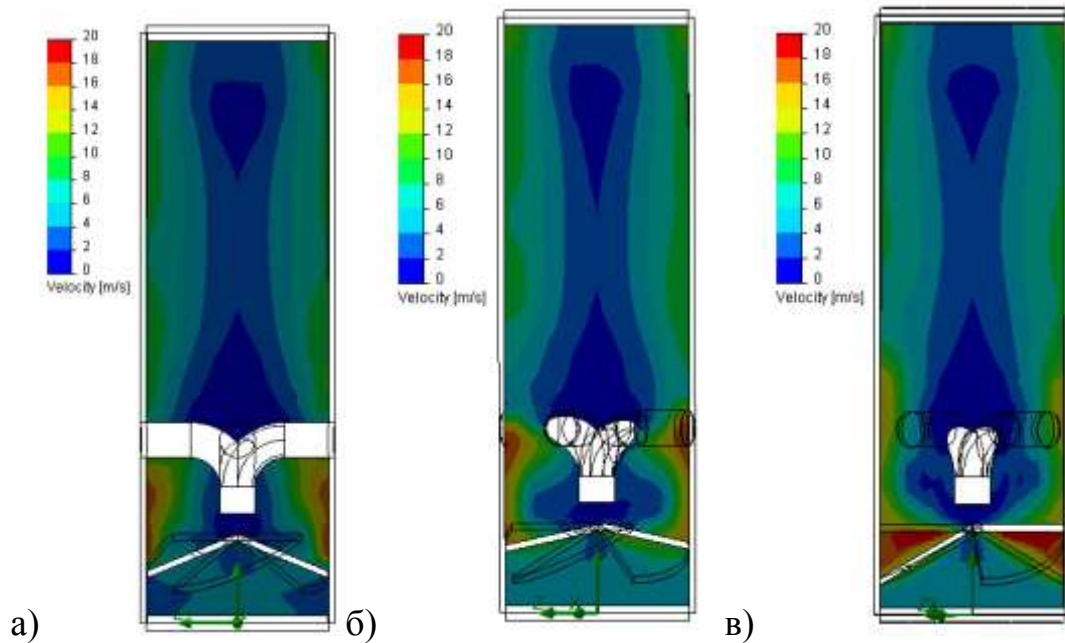
*Рух газового потоку*

Приймаючи шорсткість стінки патрубку прямокутно-центробежного елемента, граней завихрювача і поверхні трубки для подачі рідини Rz 40, одержуємо розподіл швидкості руху газового потоку, зображений на рисунку 2.14.

Початкова швидкість газового потоку - 4 м/с (дані з експерименту на фізичній моделі - розділ 3). При досягненні потоком пристрою для завихрення (який складається з 4 елементів, розташованих під кутом 30 градусів до горизонтальної площини) швидкість газу зростає до 20 м/с в результаті зменшення прохідного перерізу, відбувається завихрення частини газового потоку. Далі потік газу починає обертальний рух, швидкість зменшується до 14 м/с в результаті збільшення прохідного перерізу. Потік газу, зберігаючи обертальний рух, підіймається до трубки для подачі рідини, швидкість збільшується перед трубкою до 20 м/с. Пройшовши трубку для подачі рідини, частина потоку, яка проходить біля центральної частини трубки для подачі рідини, рухається з швидкістю менше 2 м/с, швидкість решти частини потоку збільшується в радіальному напрямі від центру до периферії від 2 до 10 м/с.

У центральній частині по висоті патрубка (на відстані приблизно 100-130 мм від нижнього краю патрубка) зона, яка відповідає швидкості руху потоку 0-2 м/с, відсутня, але ближче до верхньої частини патрубка потік газу у

осі обертання знову набуває швидкості менше 2 м/с, а це забезпечує мінімальне бризкоунесення у випадку, якщо в газовому потоці в цій частині патрубку ще буде знаходитися дрібнодисперсна рідина.



**Рисунок 2.14 - Розподіл швидкості газового потоку в контактному патрубку прямотечійно-відцентрового елемента**

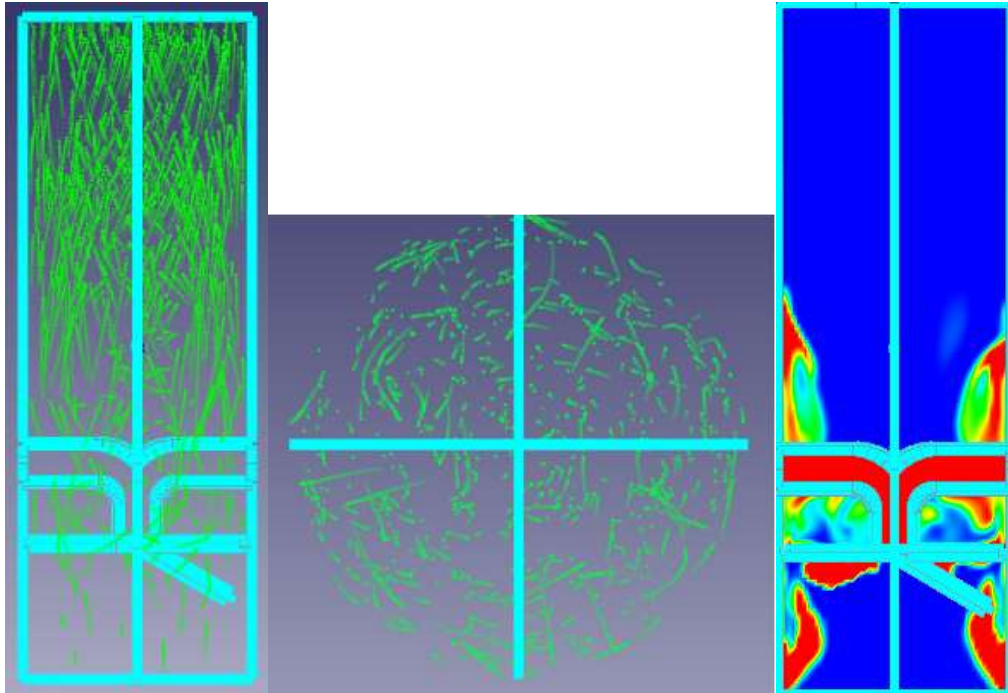
**а - площина перерізу паралельна площині YZ; б - площина перерізу розташована під кутом  $22,5^{\circ}$  до площини YZ; в - площина перерізу розташована під кутом  $45^{\circ}$  до площини YZ**

За рахунок різниці густини рідини і газу при швидкостях близьких до 0 м/с краплі рідини за рахунок сили тяжіння осідатимуть в зону патрубка, де швидкість досягає 4 м/с, коагулювати і під дією відцентрових сил відкидатися до периферії, де утворюється плівка рідини і відводиться через плівкознімач, а газ з мінімальною кількістю дрібнодисперсних крапель поступатиме на наступний контактний ступінь. Виходячи з цього, достатня для мінімального бризкоунесення висота контактного патрубка прямотечійно-відцентрового елемента - 200 мм.

#### *Рух двофазного потоку*

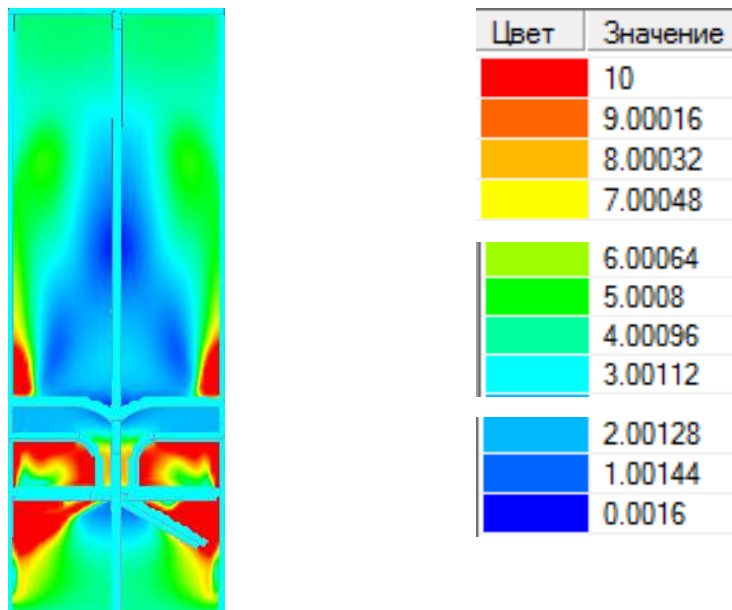
В результаті моделювання було доведено, що рідина, яка потрапляє в прямотечійно-відцентровий елемент через трубки, рухається донизу патрубка

ка, де зустрічається з протилежно направленим потоком газу. За допомогою завихрювача потік газу та рідини закручується та під дією відцентрової сили, рідина, як більш важка фаза, відкидається на стінки патрубку, і у вигляді плівки рухається вгору. Газовий потік виходить також через верхній переріз патрубку (рисунок 2.15)



**Рисунок 2.15 - Рух газорідинного потоку всередині масообмінно-сепараційного елемента**

Також було досліджено розподілення швидкостей (рисунок 2.16)



**Рисунок 2.16 - Розподілення швидкості двофазного потоку в межах контактної патрубку**

Як видно з рисунка максимальної швидкості потік досягає в межах завихрювача. Це пов'язано з тим, конфігурація завихрювача передбачає інтенсивне закручування потоку, що, в свою чергу, збільшує швидкість. У центрі патрубку швидкість дуже незначна, що дозволяє осідати рідині на стінки патрубку. Збільшення швидкості у верхньому перерізі елемента зменшує бризковинесення.

### 2.3 Визначення конструктивних розмірів вузлів підведення та відведення рідини

Для визначення конструктивних розмірів трубки для подачі рідини і площі сегментних отворів, через які рідина зливається на нижню тарілку, проводиться наступний розрахунок.

Для абсорбера з масообмінними тарілками діаметром 2400 мм, на кожній з яких розташовано по  $n=194$  масообмінно-сепараційних елементи (рисунки 1.); витрата регенованого поглинача (ДЕГа) складає  $Q = 1440$  кг/год.

Площа одного отвору для подачі рідини:

$$s = \frac{\pi \cdot d^2}{4},$$

де  $d=8$  мм - внутрішній діаметр трубки для подачі рідини.

$$s = \frac{\pi \cdot 0,008^2}{4} = 5,024 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Сумарна площа отворів на тарілці:

$$s_{\text{сумм}} = s \cdot k \cdot n,$$

де  $k=4$  – кількість отворів в одному прямотечійно-відцентровому елементі;

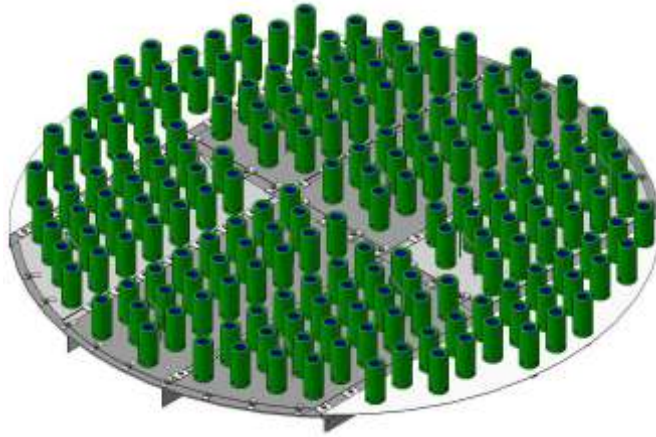
$$s_{\text{сумм}} = 5,024 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot 194 = 0,03899 \text{ м}^2$$

Швидкість руху рідини через один отвір трубки для подачі рідини:

$$v_{\text{тр}} = \frac{Q}{3600 \cdot \rho_{\text{ДЕГа}} \cdot s_{\text{сумм}}};$$

де  $\rho_{\text{ДЕГа}}=1105$  кг/м<sup>3</sup> – густина ДЕГа при 40<sup>0</sup> С.

$$v_{mp} = \frac{1440}{3600 \cdot 1105 \cdot 0,03899} = 9,284 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$$



**Рисунок 2.17 - Масообмінна тарілка з проточійно-відцентровими елементами**

Вся рідина, яка через трубку для подачі рідини поступає в масообмінно-сепараційний елемент, зливається через сегментні отвори в полотні тарілки після масообміну і сепарації.

Площа отвору для зливу рідини (рисунок 2.18):

$$s_{сегм} = \pi \frac{\alpha^0}{360^0} (R^2 - r^2),$$

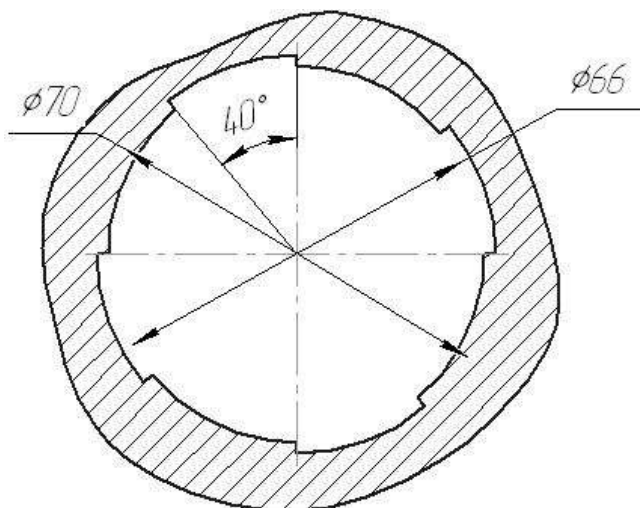
де  $R = 35$  мм - радіус внутрішньої поверхні плівкознімача,

$r = 33$  мм - радіус зовнішньої поверхні контактної патрубком.

$\alpha = 40^0$  - кут сегменту отвору.

$$s_{сегм} = \pi \frac{\alpha^0}{360^0} (R^2 - r^2)$$

$$s_{сегм} = \pi \frac{40^0}{360^0} (0,035^2 - 0,033^2) = 4,74 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$



**Рисунок 2.18 - Отвори для зливу рідини на полотні тарілки в зазорі між контактним патрубком і плівкознімачем**

Сумарна площа отворів на полотні тарілки:

$$s_{сегм}^{сумм} = s_{сегм} \cdot k \cdot n ,$$

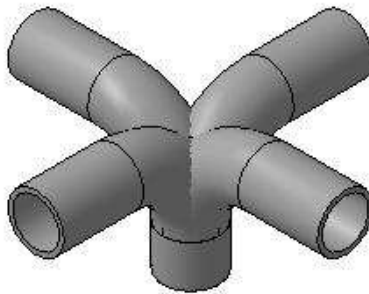
де  $k=4$  - кількість отворів, які відповідають одному прямотечіно-відцентровому елементу;

$$s_{\text{сегм}}^{\text{сумм}} = 4,74 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot 194 = 0,03682 \text{ м}^2$$

Швидкість руху рідини через один отвір в полотні тарілки:

$$v_{\text{сегм}} = \frac{Q}{3600 \cdot \rho_{\text{ДЭГа}} \cdot s_{\text{сегм}}^{\text{сумм}}};$$
$$v_{\text{сегм}} = \frac{1440}{3600 \cdot 1105 \cdot 0,03682} = 9,83 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$$

Таким чином, швидкість проходження рідини через трубку фактично дорівнює швидкості проходження рідини через отвір на полотні тарілки, а це забезпечує працездатність прямотечіно-відцентрового елемента при конструкції трубки для подачі рідини, зображеної на рисунку 2.19



**Рисунок 2.19 — Конструкція трубки для подачі рідини**

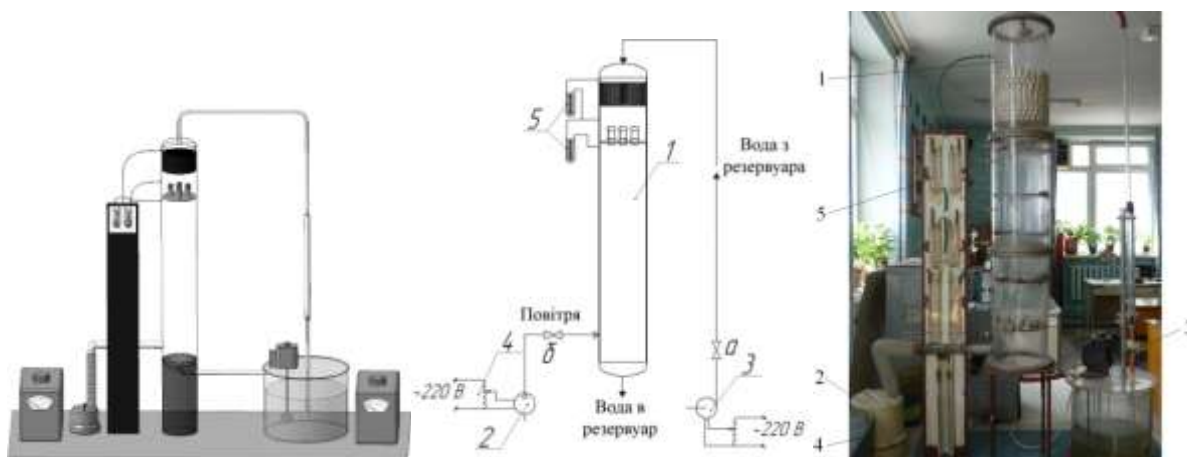
## 2.4 Висновки до другого розділу

1. Проведено аналіз силових факторів, які впливають на рух плівки рідини при її контакті з закрученим газовим потоком.
2. Визначено геометричні характеристики контактної патрубку залежно від гідродинамічних характеристик плівки рідини, яка рухається в контактному патрубку.
3. Проведено комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху однофазного та двофазного потоків в межах контактної патрубку з визначенням характеру розподілу швидкостей фаз.
4. Визначено геометрію вузла підведення рідини в контактний патрубку та відведення рідини з нього.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ РІДИНИ І ГАЗОВОГО ПОТОКУ В МЕЖАХ КОНТАКТНОЇ СТУПЕНІ

#### 3.1 Опис експериментального стенду, мета проведення експерименту

Висота масообмінно-сепараційного елемента має значний вплив на формування плівки рідини, створення оптимальної швидкості газového потоку, а також на бризковинесення. Зменшення бризковинесення можливе шляхом дослідження переходу оптимального режиму в режим унесення рідини. Для ефективного розділення газорідинної суміші необхідні відповідні параметри протікання процесу масообміну, а саме: витрати по рідинній та газовій фазі, швидкість газového потоку, а також оптимальна висота шару рідини, яка має бути на полотні тарілки.



**Рисунок 3.1 — 3D модель, принципова схема та фото експериментальної установки: 1 — колоний апарат, 2 — газодувка, 3 — насос, 4 — електротрансформатор, 5 — дифманометри**

За допомогою газодувки 2 моделі ВД-2 повітря навколишнього середовища подається в нижню частину колонного апарату 1. У верхню частину колони 1 подається поглинач з резервуару за допомогою зануреного в резервуар з водою насоса 3 моделі МШ-4 з електродвигуном. Витрата газу та поглинача регулюються за допомогою електротрансформаторів 4. Витрата газу визначається за показаннями дифманометра 5, а витрата поглинача — за показаннями ротаметра. Потік повітря піднімається знизу вгору по колоні і контактує з потоком поглинача на тарілках з масообмінно-сепараційними елементами прямоотечійно-відцентрового типу. Головною частиною експеримента-



льного стенду є тарілка з прямотечійно-відцентровими елементами (модель тарілки, яку розраховано для промислових умов, наведено на рисунку 2.17).

Основними задачами проведення експерименту є: 1) визначення умов, при яких оптимальний режим процесу контакту газової і рідинної фаз суміші переходить у режим унесення, для уникнення бризковинесення рідини; 2) визначення оптимальної висоти шару рідини на полотні тарілки для конкретних розмірів прямотечійно-відцентрового елемента і контактної пристрою; 3) дослідження поведінки рідини на полотні контактної пристрою, що сприятиме визначенню режиму, в якому працює масообмінно-сепараційна тарілка.

### 3.2 Дослідження поведінки рідини на полотні контактної ступені

За результатами експериментів виділено 5 основних випадків поведінки рідини на полотні контактної ступені:

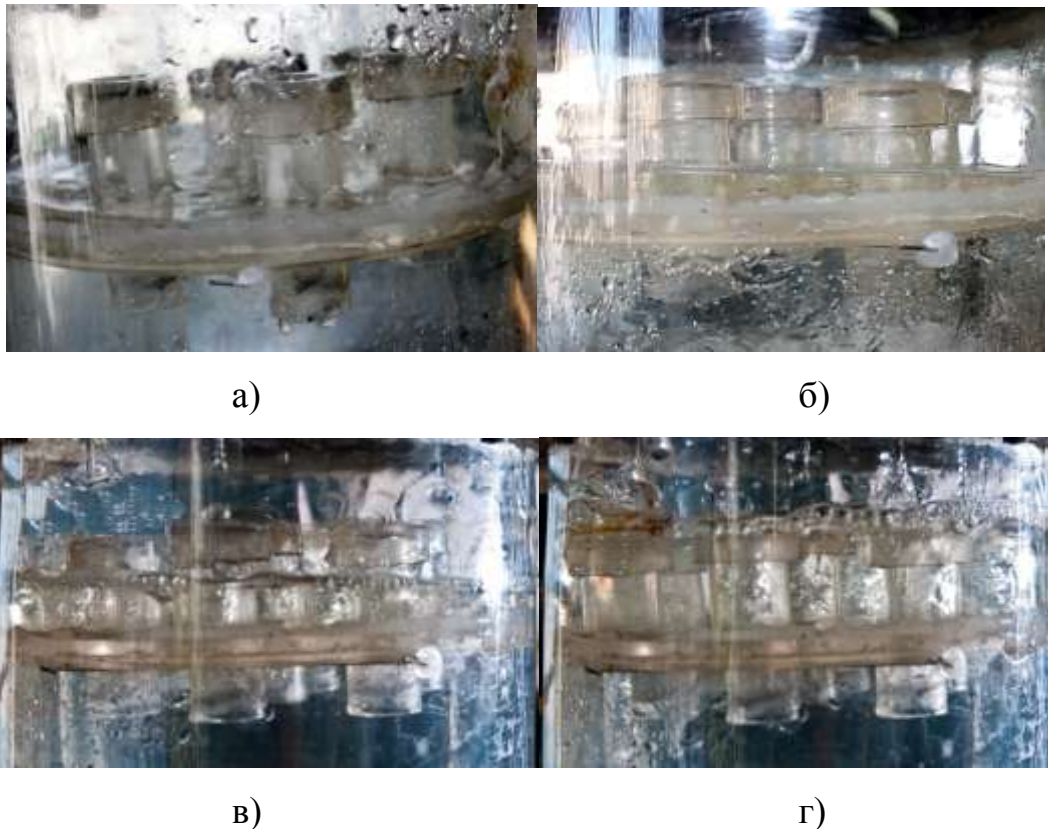
1) Висота шару рідини нижча за висоту трубки для подачі рідини. В даному випадку, висота шару рідини, що утворюється на полотні масообмінної тарілки недостатня для створення міжфазної поверхні контакту фаз, оскільки рідина не поступає в патрубок. Для цього випадку характерні незначні витрати по газовій і рідинній фазі. У цілому поверхня рідини на полотні тарілки залишається досить спокійною (рисунки 3.2,а).

2) Висота шару рідини дорівнює висоті трубки для подачі рідини. У цьому випадку, об'єм рідини поступає через трубку в центральну частину масообмінно-сепараційного елемента разом з повітрям, що небажано. Витрати по газовій і рідинній фазі незначні, як і для першого режиму. В цілому поверхня рідини на полотні тарілки залишається досить спокійною (рисунки 3.2, а). Висота шару рідини дорівнює висоті трубки для подачі рідини, і дорівнює 20 мм при висоті контактної трубки 62 мм.

3) Висота шару рідини приблизно дорівнює половині висоті масообмінно-сепараційного елемента. При відповідній висоті шару рідини і витратах по газовій і рідинній фазі, а саме  $V_e = 2 \cdot 10^{-3} - 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $V_A = 7 \cdot 10^{-3} - 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  спостерігається оптимальний режим протікання процесу масообміну, для якого характерним є інтенсивне

вихроутворення усередині контактної трубки, а також зливання рідини через плівкознімач. Оскільки масообмін відбувається усередині масообмінно-сепараційного елемента, то поверхня рідини на полотні тарілки залишається досить спокійною. Обурення викликають лише краплини, які стікають з вище розташованої тарілки (рисунк 3.2,б). Висота шару рідини дорівнює 31 мм, при висоті контактної трубки 62 мм.

4) Висота шару рідини доходить до плівкознімача. Даний випадок спостерігається при збільшенні витрат по газовій і рідинній фазах. Режим небажаний, оскільки характеризується значним бризкоунесенням. Поблизу плівкознімача спостерігається виникнення бульбашок рідини, спокій поверхні рідини на полотні тарілки порушується. Гідравлічний опір тарілки зростає (рисунк 3.2, в). Висота шару рідини дорівнює 50 мм при висоті трубки 62 мм.



**Рисунок 3.2 – Поведінка рідини на полотні контактної ступені:**

**а) випадки 1, 2; б) випадок 3; в) випадок 4; г) випадок 5**

5) Масообмінно-сепараційний елемент повністю покритий шаром рідини. При значному збільшенні витрат по газовій і рідинній фазах спостерігається режим захлинання. У даному випадку практично не створюється поверхня контакту фаз, а, як наслідок, відсутній масообмін. Газ пробивається крізь ріди-

ну у вигляді цівок, поблизу плівкознімача створюються бульбашки і піна. Поверхня рідини неспокійна, спостерігається вирування. Для випадку характерне підвищене бризкоунесення і значне зростання гідравлічного опору, у порівнянні з оптимальним режимом (300-400 МПа) (рисунок 3.2, г). Висота шару рідини перевищує висоту масообмінно-сепараційного елемента ( $>62$  мм).

Розглядаючи 5 різних випадків висоти шару рідини на полотні контактної ступені по відношенню до висоти масообмінно-сепараційного елемента, можна зробити висновок, що оптимальною є висота, яка відповідає приблизно половині висоти контактної трубки, при витратах по газовій і рідинній фазах  $V_{\text{г}} = 2 \cdot 10^{-3} - 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $V_{\text{р}} = 7 \cdot 10^{-3} - 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  відповідно. У даному випадку спостерігається оптимальний режим протікання процесу масообміну. Поверхня рідини на полотні тарілки залишається досить спокійною, обурення викликаються лише краплини, які стікають з вище розташованої тарілки.

### **3.3 Визначення меж існування оптимального режиму роботи контактної пристрою та переходу до режиму винесення рідини**

При оптимальному режимі протікання процесу масообміну зливання рідини по внутрішній стінці трубки недопустиме. Потік газу проходить через шар рідини з максимально інтенсивним вихреутворенням і створенням піни. Режим характеризується створенням міжфазної поверхні контакту фаз. Бризковинесення при оптимальному режимі мінімальне. При оптимальному режимі гідравлічний опір складає 300-400 Па, при витраті рідини і газу відповідно  $V_{\text{ж}} = 2 \cdot 10^{-3} - 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $V_{\text{г}} = 7 \cdot 10^{-3} - 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ .

На фотографіях, представлених на рисунках 3.4-3.5 можна спостерігати початок оптимального режиму і його перехід в режим унесення:

а) створюється міжфазна поверхня контакту фаз, але все ще спостерігається незначне зливання рідини по внутрішній стінці трубки у вигляді окремих краплин (рисунок 3.4, а);

б) зливання рідини спостерігається через плівкознімач, а по внутрішній стінці трубки зливання рідини відсутнє (рисунок 3.4, б);

в) весь об'єм рідини, який поступає в центральну частину патрубку повністю диспергується потоком газу. Потік газу проходить через рідину з максимальним вихроутворенням і створенням бульбашок газу і піни. Поверхня контакту фаз найбільш розвинута (рисунок 3.5, а);

г) спостерігається незначне бризкоунесення (рисунок 3.5, б);



а)

б)

**Рисунок 3.4 – Режими роботи контактної пристрою**



а)

б)

**Рисунок 3.5 – Режими роботи контактної пристрою**

### **3.4 Висновки до третього розділу**

1. Визначено оптимальну висоту шару рідини на полотні контактної ступені.
2. Встановлено діапазон існування оптимального режиму контакту газової і рідкої фази з мінімальним значенням бризковинесення і максимальною поверхнею контакту фаз.
3. Встановлено відповідність експериментальних значень конструктивних та технологічних параметрів роботи апарата колонного типу з вихровими контактними ступенями в оптимальному режимі результатам теоретичних досліджень і комп'ютерного моделювання.

## **ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ**

1. Проведено аналіз впливу силових факторів на рух плівки рідини та визначено залежність розмірів прямотечійно-відцентрового масообмінно-сепараційного елемента від гідродинамічних і технологічних чинників.
2. Проведено комп'ютерне моделювання руху однофазного та двофазного потоків в межах прямотечійно-відцентрового масообмінно-сепараційного елемента з визначенням характеру розподілу фаз та їх гідродинамічних характеристик.
3. Експериментальним шляхом визначені режими руху рідини на полотні контактної ступені та умови роботи колонного апарату з вихровими тарілками в оптимальному режимі.
4. Результати теоретичних досліджень, комп'ютерного моделювання та експерименту дозволяють визначити оптимальну конструкцію прямотечійно-відцентрового масообмінно-сепараційного елемента для визначених проєктувальником умов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войнов Н.А., Кустов А.В. Ректификация смеси этанол–вода под вакуумом // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: мат. Всерос. конф. Барнаул, 2007. Кн. 3. С. 163–166.
2. Зиберт Г.К., Седых А.Д., Кашицкий Ю.А., Михайлов Н.В., Демин В.М. Подготовка и переработка углеводородных газов и конденсата. Технологии и оборудование: Справочное пособ. - М.: ОАО "Недра-Бизнесцентр", 2001. - 316 с: ил.
3. Купавых А.Б. Технология осушки газа с применением вихревых аппаратов. / В сб.: XVIII творческая конференция, III научно-техническая выставка молодых ученых и специалистов – Уфа: АНК «Башнефть» 1999. С. 19.
4. Балыбердин А.С. Разработка и исследование вихревых контактных устройств с активным теплообменом в зоне контакта фаз / Петров В.И., Балыбердин А.С., Махоткин И.А./ Вестник Казанского технологического университета – Казань КГТУ, 2006. – С. 52–56.
5. Н.А. Войнов. Вихревые контактные ступени для ректификации / Н.А. Войнов, Н.А. Николаев, А.В. Кустод, А.Н. Николаев, Д.В. Тароватый / Химия растительного сырья. – 2008. – № 3. – С.173–184.
6. Гольдштик М.А. Вихревые потоки / Гольдштик М.А. – Новосибирск: Наука, 1981. – 366 с.