

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ РІДИННО-ГАЗОВИХ ЕЖЕКТОРІВ З КОМПАКТНИМ ТА ДИСПЕРГОВАНИМ СТРУМЕНЕМ РІДИНИ

Пономаренко В. В., Пушанко М. М., Хитрий Я. С., Люлька Д. М., Бабко Є. М.

### 1. Вступ

Ежектори широко використовують у техніці як насоси, апарати для проведення різноманітних технологічних процесів, теплові насоси, очисники повітря та ін. Їх перевагами порівняно з іншим обладнанням є відсутність рухомих частин, надзвичайна простота конструкції, висока надійність роботи, недоліками – низький коефіцієнт корисної дії [1].

До процесів, що можуть бути здійснені в цукровій промисловості в ежекційних апаратах, відносяться:

- змішування компонентів фаз (цукрового соку та вапняного молока) для проведення наступного процесу дефекації цукрового розчину;
- сульфитація барометричної води, соку та сиропу, перша та друга сатурації, деамонізація конденсатів.

З перерахованих процесів ежекційні апарати застосовують лише в сульфитаторах для води, соку та сиропу. Струминні сульфитатори розроблено на початку минулого століття [2], однак не знайшли належного застосування. У 70-х роках ХХ ст. на основі нових наукових здобутків вони були модернізовані та знову запропоновані для проведення сульфитації замість барботажних та зрошувальних апаратів.

Їх перевагами є інтенсивність масообмінних процесів, у десятки разів менша питома металомісткість апаратів, значне зменшення викидів сірчистого газу в атмосферу.

Проте струминні сульфитатори мають і ряд недоліків, що викликані як не стабільністю роботи цукрового заводу в цілому, так і станції сульфитації. Головною причиною є постійна зміна витрати рідини, що призводить до частоті зміни тиску на соплі форсунки, а отже і до не стабільної роботи ежекційного апарату. Внаслідок цього виникає складність підтримання оптимального рН розчину, що жорстко регламентується технологічним процесом, низьке використання діоксиду сірки, що призводить до корозії витяжної труби, раптове припинення ежекції і, як наслідок, загазованість приміщення сульфитаційним газом.

Контроль викидів сірчистого газу в атмосферу екологічною службою викликає накладання штрафних санкцій на підприємство. Таким чином, технічна не досконалість обладнання викликає перевитрату як матеріальних, так і грошових ресурсів, що приводить до збільшення собівартості цукру.

Створення більш досконалого обладнання можливе лише при всебічному вивченні гідродинаміки водо-газового потоку в камері змішування ежектора – основного елемента струминної сульфитаційної установки, що дозволить науково обґрунтовано розраховувати розміри сульфитатора та його елементів.

Широке впровадження ежекторів в техніку для виконання ними інших технологічних завдань стримується тією ж причиною – недостатня кількість експериментальних досліджень ежекторів з циліндричною камерою змішування та компактним або диспергованим струменем рідини при низьких тисках подачі активного потоку.

## **2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит**

*Об'єктом дослідження є фізична модель ежекційного апарата струминного сульфітатора з струминною форсункою (компактним струменем рідини) та відцентрово-струминною (диспергованим струменем рідини).*

Інтенсивні ежекційні апарати в цукровій промисловості використовують не так широко, як можна було б очікувати. Можливо це пов'язано з віковою традиційною технологією виробництва цукру, для якої характерні низька швидкість хімічних реакцій, значна тривалість процесів очищення.

Аналіз роботи струминних сульфітаційних установок на цукровому заводі дозволив виявити такі проблемні місця, як можливість попадання сірчистого ангідриду після сіркоспалюваної печі в робоче приміщення, що викликає перевищення норм вмісту  $\text{SO}_2$  в повітрі. Не повна його утилізація погіршує екологічну ситуацію. Контроль рН розчину, що обробляється в сульфітаторах показує значні коливання від визначених технологічним регламентом. Основною причиною є незадовільна робота ежекційного апарату сульфітатора.

Витрати сірки на цукровому виробництві є доволі значним: на 1 т сировини припадає 0,25 кг для сульфітаторів зрошувального типу та 0,39 кг для струминних сульфітаторів [3, 4] і перевищують аналогічні показники витрат на закордонних заводах [3].

Крім підвищених витрат сірки, на процес з відпрацьованим сульфітаційним газом втрачається близько 0,25 % рідини до маси буряків, при цьому її температура знижується в межах  $1,0 \dots 1,4^\circ\text{C}$  [3]. В роботі [5] пропонується способи утилізації відпрацьованого сірчистого газу і теплових викидів після сульфітаторів на технологічні потреби при виробництві цукру.

Одним із способів зменшення втрат є створення більш досконалого обладнання з раціональними геометричними розмірами, що потребує для проведення технологічного процесу менше реагентів. Це може бути лише при всебічному вивченні гідродинаміки та виявленні особливостей роботи ежекційного апарата в усьому діапазоні робочих тисків. Такий підхід дасть змогу зменшити втрати як хімічного, так і теплового потенціалу завдяки більш повному використанню  $\text{SO}_2$  з сульфітаційного газу при його меншій загальній кількості.

## **3. Мета та задачі дослідження**

Метою дослідження є встановлення закономірностей гідродинаміки течії водно-газової емульсії в камері змішування ежектора з подовженою камерою змішування та струминною і відцентрово-струминною форсункою.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі завдання:

1. Дослідити роботу типового сульфітатора на фізичній моделі та виявити закономірності й особливості течії водогазової емульсії.

2. Дослідити роботу ежектора з диспергованим струменем рідини, виявити закономірності та особливості течії водогазової емульсії.

3. Встановити значення геометричної характеристики ежекторів, за яких досягається максимальний коефіцієнт ежекції.

#### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Типовий струминний сульфітатор для цукрового заводу середньою продуктивністю 3000 т/добу для сульфитації барометричної води ПСК-3 (Смілянський машинобудівний завод, Україна) – це циклонний роздільник фаз газ-рідина, до якого тангенційно приєднано ежекційний апарат. Як робоче сопло для диспергування рідини в ньому використовується диск з п'ятьма отворами, що формально є струминними форсунками [6, 7], а камерою змішування – коротка циліндрична труба. Аналогічну конструкцію мають і сульфітатори для соку та сиропу (відмінність лише в кількості та діаметрах отворів для диспергування рідини).

Кожний сульфітатор може працювати як окремо з індивідуальною сіркоспалювальною піччю та сублиматором, так і з загальним газовим колектором. Роботу кількох сульфітаторів із загальним газовим колектором описано в [8]. Проте гідродинаміку ежекційного апарата належним чином не було досліджено, чим і пояснюються його недоліки, виявлені за роки експлуатації апаратів.

Традиційно в ежекційних апаратах використовується як активне сопло струминна форсунка. Такі апарати доволі широко досліджені [1, 9–15] як теоретично, так і експериментально. Однак більшість відомих досліджень ежекторів проведені при високих тисках подачі рідини.

Слід звернути увагу на те, що процес сульфитації є масообмінним процесом, для якого важливого значення набуває не тільки кількість ежектуемого газу, а також поверхня контакту фаз.

Струминна форсунка не може забезпечити необхідну площу контакту фаз, тому було запропоновано змінити тип розпилювача з струминного на відцентрово-струминний або кавітаційний [16]. Це дозволило покращити процес сульфитації, та ґрунтовних досліджень що до впливу такої заміни на гідродинаміку ежектора проведено не було.

Для ежекторів з компактним струменем рідини знайдені кореляції об'ємного коефіцієнта ежекції на прикладі десорбції  $O_2$  з води в інертний газ [17]. Встановлено, що площа поверхні контакту фаз збільшується від швидкості рідини в соплі, максимальна ежекція відбувається при співвідношенні діаметра горловини до діаметра сопла близько 2, що співпадає з дослідженнями інших авторів.

Дослідження ежекторів з диспергованим струменем рідини є значно менше, наприклад, робота [9]. Був розглянутий ежектор в вертикальному положенні та різними струменями рідини: циліндричним закрученим, циліндричним не закрученим, конічним. Експериментально доведено, що використання закрученого струменя збільшує швидкість масообміну на 80 %.

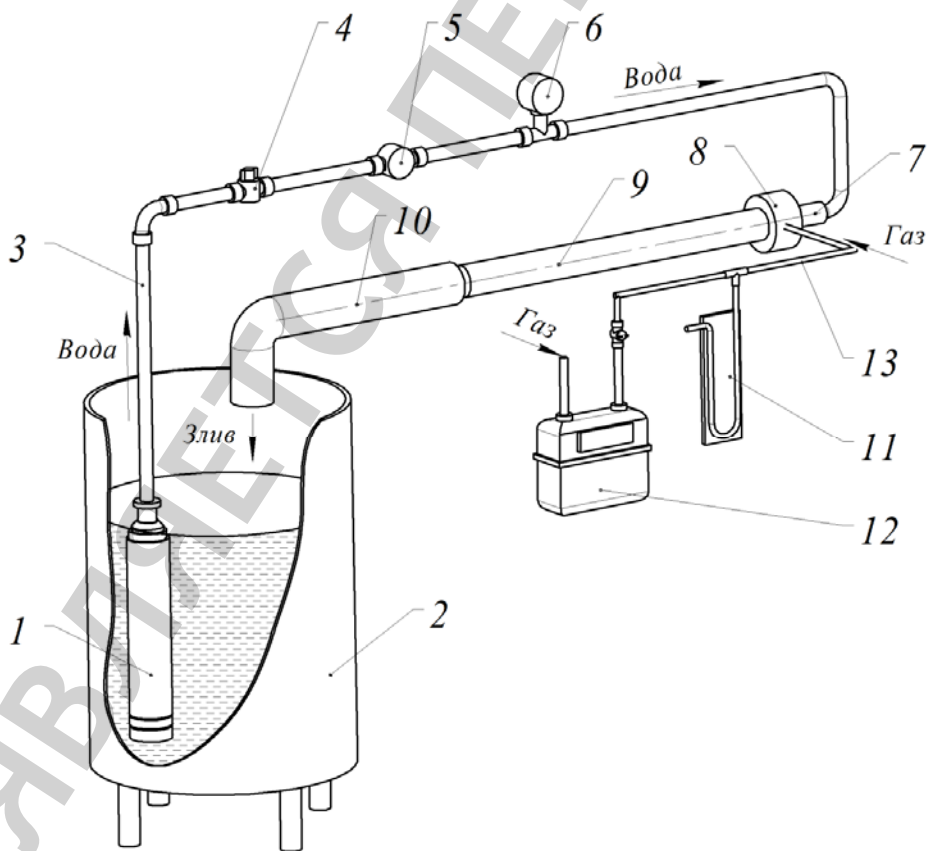
Досліджень масообмінних процесів в ежекторах з компактним та диспергованим струменем рідини при сульфитації цукрових розчинів не відомо. Це не дозволяє обґрунтовано розраховувати основні геометричні розміри ежектора

при його проектуванні. Гідродинаміка течії водо-газової емульсії в камері змішування ежектора потребує додаткового дослідження.

### 5. Методи дослідження

Для встановлення закономірностей течії двофазного потоку в ежекційному апараті, було спроектовано та виготовлено лабораторну установку (рис. 1). До її складу входять ежекційний пристрій з подовженою камерою змішування 9, приймальна камера 8, розпилювач 7 і патрубки подачі рідини та газу. Рідина до розпилювача 7 ежектора подається насосом 1 під тиском, що контролюється манометром 6. Витрату рідини регулювали краном 4. Контроль витрати рідини та газу здійснювали за допомогою витратомірів 5, 12 об'ємного типу. Розрідження в ежекторі вимірювали дифманометром 11.

Тиск контролювали за допомогою манометра пружинного типу ОБМ1-160 (Україна). Витрату рідини вимірювали лічильником води ЕТМ КВ 1,5 (Україна). Для вимірювання витрати газу застосовували газовий лічильник PREMA G 1,6 (Україна). Розрідження в приймальній камері ежектора контролювали диференціальним манометром. Фотозйомку течії рідини в камері змішування здійснювали цифровою фотокамерою Canon SX130 (Китай). Оброблення експериментальних даних і побудову графіків виконували за допомогою табличного процесора Microsoft Office Excel.



**Рис. 1.** Експериментальна установка: 1 – насос; 2 – мірна ємність; 3 – трубопровід; 4 – кран; 5 – витратомір рідини; 6 – манометр; 7 – розпилювач; 8 – приймальна камера; 9 – камера змішування; 10 – зливний трубопровід; 11 – дифманометр; 12 – витратомір газу; 13 – газопровід

Досліджували ежекційний апарат зі струминною форсункою (рис. 2) з діаметром сопла  $d_c=3, 4, 6, 8$  мм. Камерою змішування були прозорі трубки діаметром  $D_{к.з}=8, 15, 19, 27, 45$  мм. Тиск рідини змінювався в межах  $0,05 \dots 0,25$  МПа. Низькі тиски рідини характерні для роботи насосів цукрового заводу і зокрема сульфитаторів.

Проведення процесу сульфитації пов'язано з хімічними реакціями між газовою та рідкою фазами, що потребує значної поверхні контакту фаз. Її можна отримати заміною типу розпилювача струминного типу на відцентрово-струминний, що характеризується розпадом струменя рідини на незначній відстані від сопла форсунки та заповненим факелом розпилення краплями рідини поперечного перерізу. Тому струминну форсунку (рис. 2) було замінено на відцентрово-струминну (рис. 3). Для цього використано корпус струминної форсунки, в якому розміщено вставку з чотирма нахиленими каналами та центральним отвором. Камери змішування використовували ті самі.

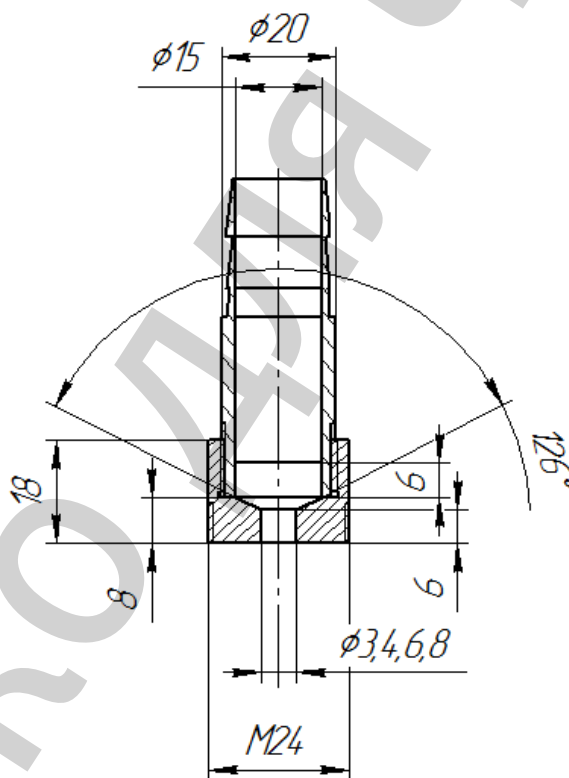
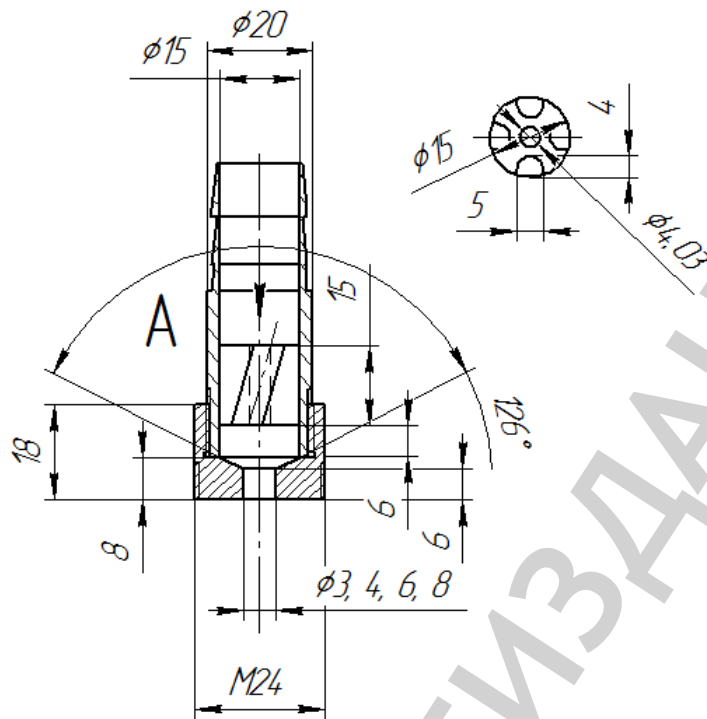


Рис. 2. Конструкція струминної форсунки



**Рис. 3.** Конструкція форсунки відцентрово-струминного типу із центральною вставкою

Для візуального спостереження та фотозйомки течії емульсії в скляній камері змішування воду, що циркулює в системі, було забарвлено харчовим барвником.

Геометрична характеристика ежектора – це відношення діаметра камери змішування до діаметра активного сопла –  $D_{к.з}/d_c$ .

Об'ємний коефіцієнт ежекції  $u$  (відношення витрати пасивного потоку до витрати активного) визначаємо за формулою:

$$u = Q_{газ} / Q_{рід}$$

де  $Q_{газ}$  – витрата газу,  $м^3/с$ ;  $Q_{рід}$  – витрата рідини,  $м^3/с$ .

## 6. Результати досліджень

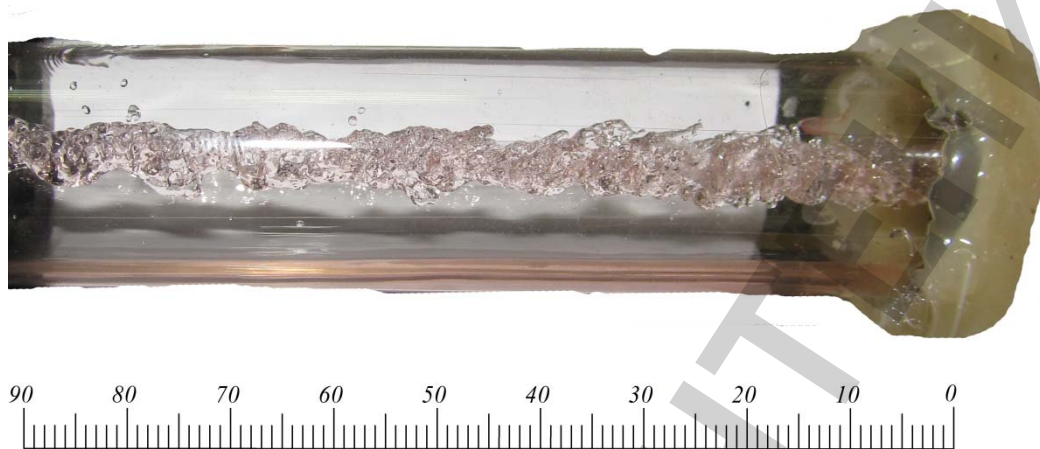
### 6.1. Результати досліджень ежектора з компактним струменем рідини

Характерний режим течії двофазного потоку в камері змішування діаметром 45 мм зі струминною форсункою діаметром сопла 4 мм (геометрична характеристика ежектора 11,25) показано на рис. 4.

Геометрична характеристика дослідженого ежектора 11,25 збігається з її значенням для типового струминного сульфитатора води типу ПСК. На рис. 4 подано якісну картину течії рідини, яка показує, що за такої геометричної характеристики струмінь рідини із сопла форсунки не торкається стінок камери змішування.

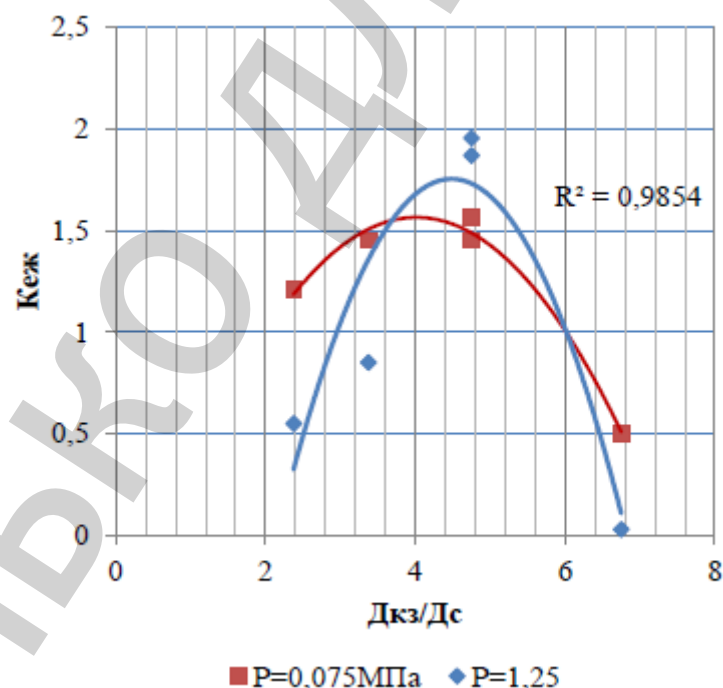
На низьку ежектувальну здатність ежектора впливає також зворотний потік рідини в нижній частині скляної труби, направлений протилежно основному потоку та спричинений розрідженням у приймальній камері ежектора. Опір вхідного газового тракту перевищує опір входу газу з торця камери змішуван-

ня. У типовій сульфатаційній установці за рахунок зменшеного гідравлічного опору з боку виходу газу в атмосферу (внаслідок природної тяги гарячого парогазового потоку через витяжну трубу) спостерігається незначна ежекція сульфатаційного газу, якість оброблення рідини низька.



**Рис. 4.** Режим течії в камері змішування газорідинного ежектора з геометричною характеристикою 11,25

Для встановлення числового значення геометричної характеристики ежектора, за якого досягається максимальний коефіцієнт ежекції, проведено дослідження в діапазоні її зміни 1,8...12,25, результати яких показано на рис. 5.



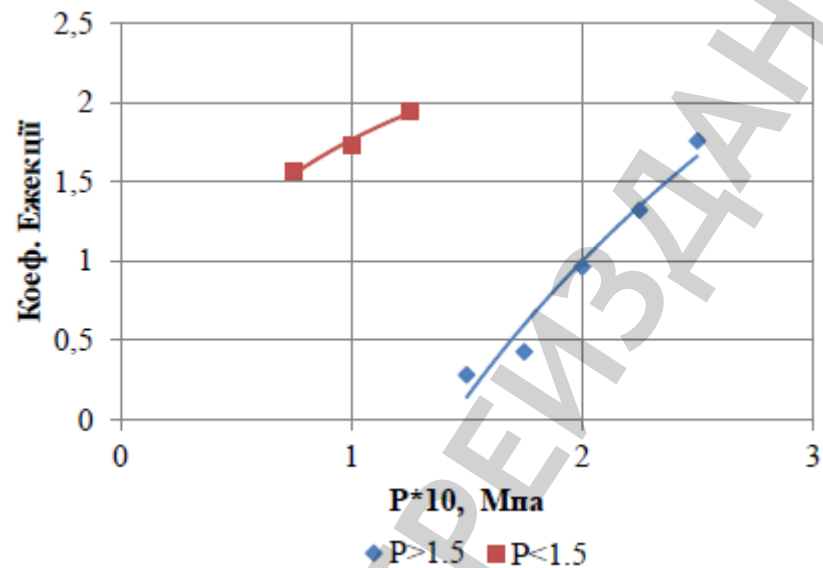
**Рис. 5.** Залежність об'ємного коефіцієнта ежекції від відношення  $D_{кз}/d_c$  для ежектора з компактним струменем за тиску подачі рідини на сопло форсунки

Дослідження ежектора з геометричною характеристикою 4,75 ( $D_{кз}=19$ ,  $d_c=4$ ) показали, що за певного тиску рідини на форсунці настає режим запирання ежектора, тобто ежекції газової фази не має. Такий режим також виявлений



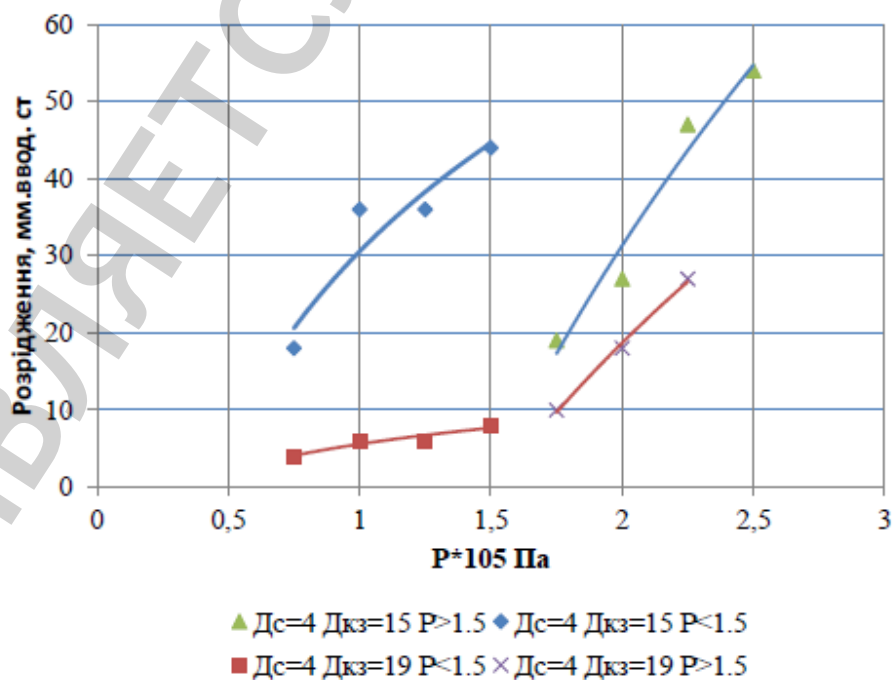
при дослідженні ежектора з компактним струменем рідини за інших значень геометричної характеристики.

Режим запирання ежектора описано в [1, 9] за значних тисків подачі активної фази. При цьому швидкість витікання із сопла форсунки близька до швидкості звуку або перевищує її. За низьких тисків роботи ежектора режим запирання виявлено вперше. Характерний графік залежності показано на рис. 6.



**Рис. 6.** Залежність об'ємного коефіцієнта ежекції від тиску подачі рідини на форсунку за  $D_{к.з}=19 \text{ мм}$ ,  $d_c=4 \text{ мм}$

Залежність розрідження в камері змішування при горизонтальному розміщенні камери змішування від тиску рідини на форсунці представлено на рис. 7.



**Рис. 7.** Залежність розрідження в камері змішування від тиску рідини на форсунці



У разі збільшення тиску подачі рідини з мінімального до 0,15 МПа розрідження в приймальній камері і коефіцієнт ежекції збільшуються. За тиску близько 0,15 МПа ежектор перестає працювати (настає режим запирання) – розрідження в камері змішування падає до нуля. З подальшим збільшенням тиску подачі рідини на сопло форсунки до 0,3 МПа коефіцієнт ежекції і розрідження знову починають збільшуватися. Режим запирання настає за умови, що гідравлічний опір тракту подачі газової фази в ежектор дорівнює розрідженню в його приймальній камері.

### 6.2. Дослідження ежектора з диспергованим струменем рідини

За зміни типу розпилювача на відцентрово-струминну форсунку режим течії емульсії в камері змішування якісно змінився (рис. 8). Кут розкриття факела розпиленої рідини становить близько  $40^\circ$  і рідина торкається стінок камери розпилювання.

Візуальне спостереження за течією рідини в камері змішування ежектора з  $d_c=4$  мм і  $D_{к.з}=27$  мм показує наявність значних зворотних потоків рідини в нижній частині камери змішування до сопла форсунки. Це, як і в разі використання як робочого сопла ежектора струминної форсунки, призводить до зниження ефективності роботи ежектора. Зворотні потоки рідини формуються вже при утворенні крапель рідини. На рис. 8 помітна траєкторія руху крапель у напрямку, зворотному траєкторії руху основної маси крапель унаслідок розрідження в приймальній камері.

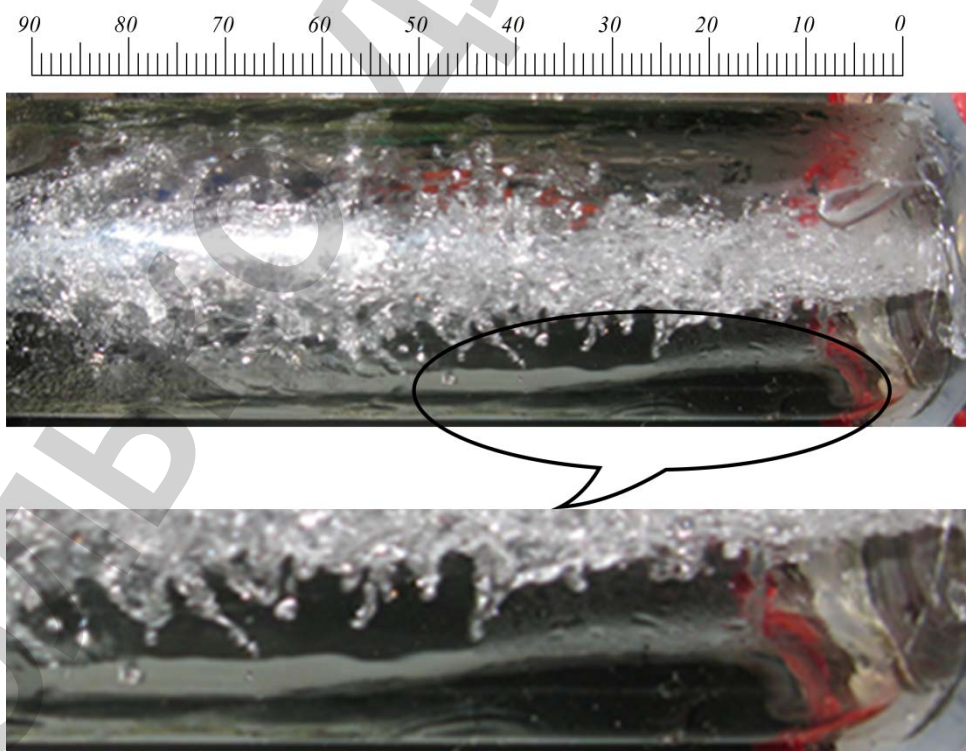
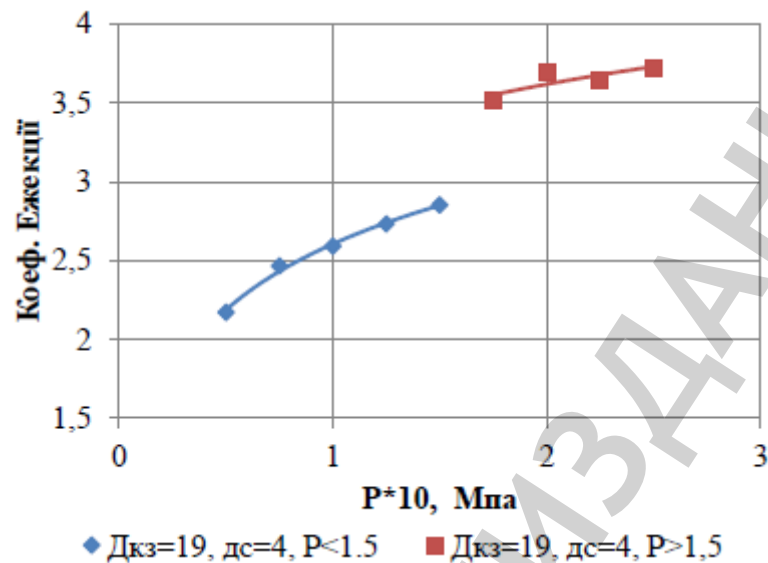


Рис. 8. Режим течії рідини при виході із сопла форсунки

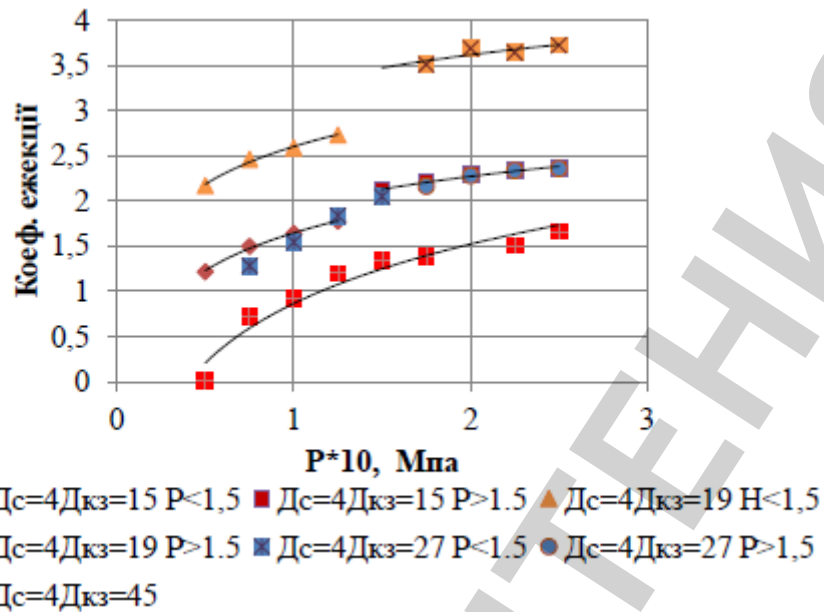
Залежність об'ємного коефіцієнта ежекції від тиску рідини на форсунці за  $D_{к.з}=19$  мм і  $d_c=4$  мм приведено на рис. 9.



**Рис. 9.** Залежність об'ємного коефіцієнта ежекції від тиску рідини на форсунці

Із графіка представленого на рис. 9, видно, що коефіцієнт ежекції збільшується зі збільшенням тиску рідини на форсунці (збільшується витрата рідини). За певного тиску подачі рідини на форсунку настає нестабільна робота ежектора, що проявляється в припиненні всмоктування газової фази (режим запирання). Як і у разі, коли робочим соплом є струминна форсунка, спостерігається розрив функції в діапазоні тисків рідини 0,14...0,17 МПа. За таких тисків рідини настає нестабільна робота ежектора, що проявляється у відсутності ежекування пасивного потоку.

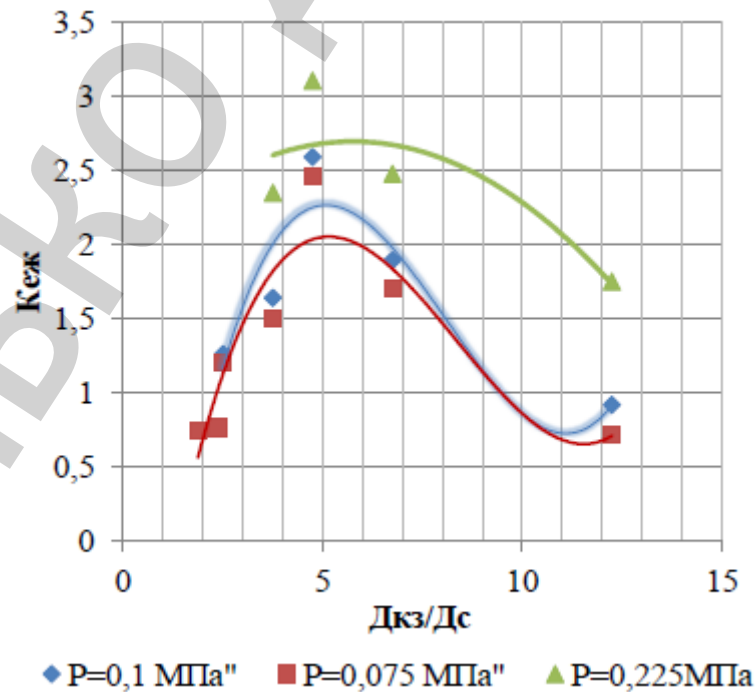
Аналогічні залежності виявлено при дослідженні ежекторів з диспергованим струменем рідини та іншими геометричними характеристиками 3,75 ( $D_{к.з}=15$  мм і  $d_c=4$  мм), 4,75 ( $D_{к.з}=19$  мм і  $d_c=4$  мм), 6,75 ( $D_{к.з}=27$  мм і  $d_c=4$  мм) (рис. 10). У цьому діапазоні тисків спостерігається режим запирання ежектора.



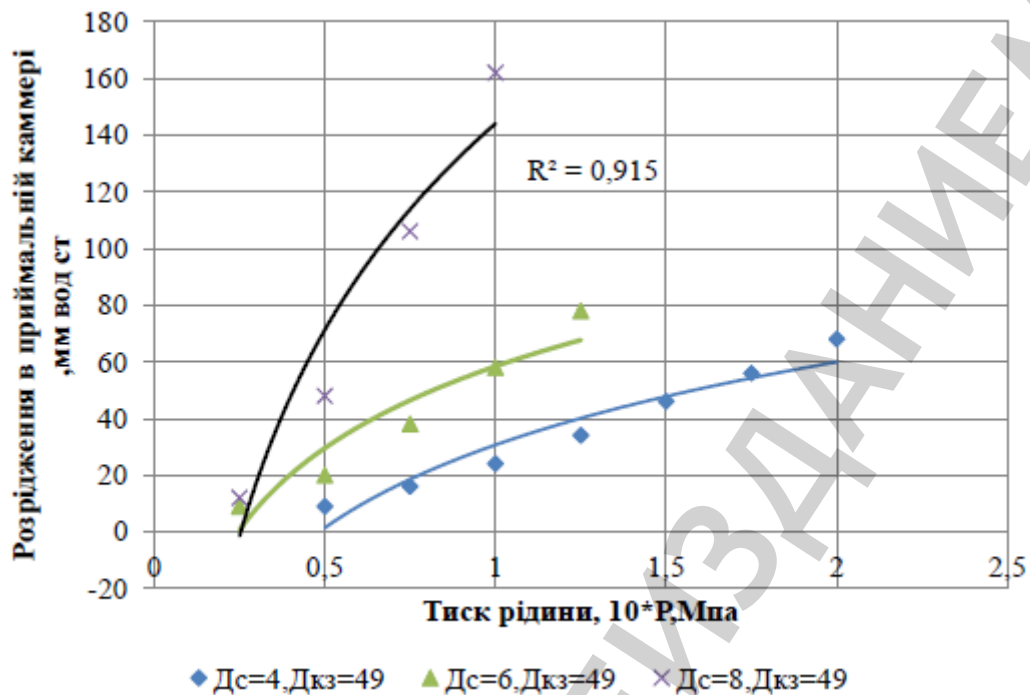
**Рис. 10.** Залежність об'ємного коефіцієнта ежекції від тиску рідини на форсунці при  $d_c=4$  мм та  $D_{kз}=15, 19, 27$  мм

Дослідження ежекторів з різним значенням геометричної характеристики дало змогу знайти залежність об'ємного коефіцієнта ежекції від головного геометричного параметра ежектора (рис. 11). Максимальне значення коефіцієнта ежекції досягається в діапазоні значень головної геометричної характеристики ежектора 4...7.

Важливою характеристикою ежектора є розрідження, що створюється в його приймальній камері. Залежність розрідження в камері змішування при її горизонтальному розміщенні від тиску рідини на форсунці показано на рис. 12.



**Рис. 11.** Залежність об'ємного коефіцієнта ежекції від головної геометричної характеристики ( $D_{kз}/d_c$ )



**Рис. 12.** Залежність розрідження в камері змішування від тиску рідини на форсунці

Для камери змішування діаметром 49 мм розрідження в приймальній камері зростає зі збільшенням діаметра сопла від 4 мм до 8 мм (значення геометричної характеристики ежектора 6,12). Найбільшого значення розрідження досягає за значень геометричної характеристики ежектора 4...6.

### 6.3. Режим запирання ежектора

При дослідженні роботи ежектора за низьких тисків подачі рідини на робоче сопло форсунки 0,14...0,17 МПа спостерігається явище запирання ежектора, за якого всмоктування пасивного потоку припиняється. Таке явище відоме за значних швидкостей потоку, має назву кризи опору та виникає за чисел Рейнольдса  $Re$  порядку  $10^5$  [1, 9]. Пояснюється перехідним режимом руху граничного шару, зміщенням ліній відриву вниз у кормову область обтічного тіла.

Нові дослідження гідродинаміки двофазного потоку в факелі розпилення механічної форсунки [18, 19] виявили виникнення кризи опору крапель за перехідних чисел Рейнольдса  $Re \approx 40...130$ . Криза опору виникає не безпосередньо біля сопла форсунки, де фази активно взаємодіють, обмінюються імпульсом, а на певній відстані від сопла, де взаємодія зменшується, потоки імпульсів не змінюються, а радіальні профілі гідродинамічних характеристик автомодельні [18].

Дослідження ежекторів з компактним і диспергованим струменем рідини показали режим відсутності ежекції (режим запирання) за низьких тисків подачі рідини, який пояснюється ранньою кризою опору.

Найвиразніше режим запирання проявляється за значення геометричної характеристики, за якого досягається максимальний коефіцієнт ежекції, а при її віддаленні від цього значення виражений слабше.

Залежність коефіцієнта ежекції від витрати рідини  $K_{\text{еж}}=f(Q_p)$  рис. 13 підтверджує висновок про наявність перехідного режиму течії водоповітряної емульсії по довжині камери змішування ежектора, що пояснює режим запирання ежектора.

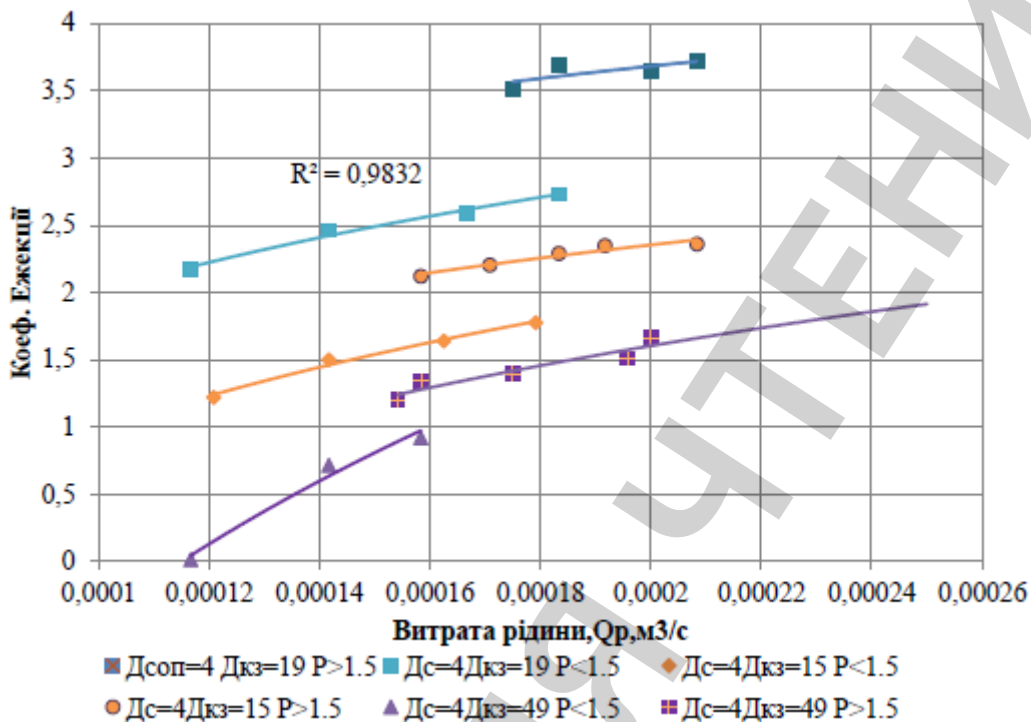


Рис. 13. Залежність коефіцієнта ежекції від витрати активного потоку

Цей висновок ґрунтується на тому, що за однієї й тієї ж витрати рідини через форсунку в межах 0,00016...0,00019 м³/с (при цьому тиск рідини на форсунці був різний) досягнуто різних коефіцієнтів ежекції. Для прикладу: при дослідженні ежектора з  $d_c=4$  мм і  $D_{кз}=19$  мм за тиску рідини  $P_p=0,125$  МПа її витрата становила 0,000183 м³/с, а коефіцієнт ежекції – 2,73. За тиску рідини  $P_p=0,2$  МПа витрата рідини знову була такою ж самою, проте коефіцієнт ежекції збільшився до 3,69. Тобто за підвищення тиску в 1,6 рази витрата рідини не змінилась, коефіцієнт ежекції зріс в 1,35 рази. Пояснити роботу ежектора можна з урахуванням ранньої кризи опору краплі за малих ( $Re \approx 40 \dots 130$ ) значень критерію Рейнольдса.

Дослідження ежектора зі струминною форсункою як робочого сопла зумовлене необхідністю встановити причини незадовільної роботи струминного сульфітатора в промислових умовах. Це проявляється в нестабільності рН обробленого розчину, загазованості робочого приміщення сульфітаційним газом, низькій утилізації  $SO_2$ .

Проведені дослідження (візуальні спостереження та натурні заміри) на фізичній моделі з геометричною характеристикою ежектора 11,25 підтверджують неефективну роботу ежекційного апарата типового сульфітатора внаслідок необґрунтованого вибору геометричних розмірів ежектора. Струмінь рідини не торкається стінок камери змішування, наявність зворотних потоків рідини значно знижують коефіцієнт ежекції.

Найбільша ефективність роботи ежектора досягається за геометричної характеристики в межах 3...6, при якій досягається найбільше числове значення коефіцієнт ежекції. Збільшення тиску, під яким розпилюється рідина, також приводить до збільшення коефіцієнта ежекції.

При розробці ежекційних апаратів, в яких суміщаються функції ежекування газového потоку та проведення цільових тепломасообмінних процесів, тобто важливого значення набуває поверхня контакту фаз, доцільна зміна типу розпилювання з відцентрового на відцентрово-струминне. Режим течії емульсії в камері змішування якісно змінюється.

Наявність значних зворотних потоків рідини в нижній частині камери змішування до сопла форсунки показує, що при низьких тисках подачі рідини течія емульсії не симетрична по поперечному перерізу. Це необхідно враховувати задачею відповідних краєвих умов при математичному моделюванні. Зворотні потоки рідини формуються внаслідок розрідження в приймальній камері ежектора.

Максимальне значення коефіцієнта ежекції і розрідження в приймальній камері досягається в діапазоні значень головної геометричної характеристики ежектора 4...7.

При дослідженні роботи ежекторів за низьких тисків подачі рідини на робоче сопло форсунки спостерігається явище запирання ежектора, за якого всмоктування пасивного потоку припиняється. Як і у разі, коли робочим соплом є струминна форсунка, спостерігається розрив функції в діапазоні тисків рідини 0,14...0,17 МПа. За таких тисків рідини настає нестабільна робота ежектора, що проявляється у відсутності ежекування пасивного потоку.

Пояснити режим запирання ежектора при низьких тисках можна, спираючись на виникнення кризи опору крапель за перехідних чисел Рейнольдса  $Re \approx 40 \dots 130$ .

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* Перевагами об'єкту дослідження є простота обладнання, а отже і висока надійність роботи, що обумовлює їх широке використання в техніці. Використання їх в авіаційній техніці як основного елемента реактивних двигунів стимулювало дослідження ежекторів при високих швидкостях потоків та компактним струменем рідини. Роботи направлені на збільшення коефіцієнту корисної дії, що дозволяє більш ефективно використовувати енергію стисненої рідини.

*Weaknesses.* Набагато менше досліджена робота класичного ежектора при низьких тисках подачі рідини. І зовсім мало робіт, що виконані для ежекторів з диспергованим струменем рідини та циліндричною камерою змішування. Відсутність достовірних результатів призводить до неефективної роботи ежекторів, що закладені вже на стадії проектування. Робота струминних сульфитаторів на цукровому заводі підтверджує сказане. нестабільна робота обладнання, складнощі в підтриманні технологічних вимог до обробленої рідини, високі витрати сірки на процес потребують пояснення та усунення недоліків. Отримані результати досліджень дозволяють пояснити низьку ефективність роботи струминних сульфитаторів та дозволяють спроектувати більш енергоощадне облад-



нання, що працює стабільно та дозволяє отримати оброблену рідину згідно технологічного регламенту.

*Opportunities.* Подальші дослідження роботи ежекторів повинні бути продовжені. Крім основного геометричного параметру важливу роль відіграють місця входу потоків в камеру змішування, довжина самої камери та ін. Вибір оптимальних геометричних розмірів в комплексі приведуть до створення ежекторів високої продуктивності. При використанні ежекторів, що виконують додаткові функції (наприклад, в камері змішування проходять масообмінні процеси), необхідні також дослідження і масопереносу.

*Threats.* Недосконала робота сульфитаторів призвела до пошуку інших способів сульфитації продуктів цукрового виробництва. Наприклад, до сульфитації рідин сірчаною кислотою. Однак, крім простоти дозування цей спосіб не має переваг перед сульфитацією сірчистим ангідридом, який отримують при спалюванні кускової сірки. Його відновлювальні властивості дозволяють провести відповідні хімічні реакції, стерилізувати рідину. Загалом отримується якісна та ефективна обробка.

## 8. Висновки

1. Проведено дослідження ежекторів з компактним струменем рідини в діапазоні зміни геометричної характеристики ежектора 1,3...11,25 та знайдені їх значення, за яких досягається максимальний коефіцієнт ежекції. Числове значення цього коефіцієнта залежить від тиску подачі на сопло форсунки активного потоку і зростає з його збільшенням. При тиску рідини на соплі форсунки  $P=1,25 \cdot 10^5$  Па коефіцієнт ежекції досягає числового значення 2,0.

2. Встановлено значення геометричної характеристики ежектора з диспергованим струменем рідини (4...7), за яких досягається максимальний коефіцієнт ежекції. Зі збільшенням тиску подачі рідини на сопло форсунки числове значення  $K_{\text{еж}}$  зростає (при тиску  $P=0,225$  МПа коефіцієнт ежекції досягає значення 3,5).  $K_{\text{еж}}$  перевищує аналогічний показник для ежектора з компактним струменем рідини на 15...20 %.

3. Виявлено, описано та пояснено режим запирання ежектора за низьких тисків подачі рідини на сопло форсунки. Режим запирання настає за умови рівності опорів підвідного газового тракту та опору руху водоповітряної емульсії в камері змішування ежекторів. Для досліджених ежекторів режим запирання настає за тисків подачі рідини 0,14...0,17 МПа.

## Література

1. Aleksandrov, V. Yu. Optimal'nye ezhektory (teoriia i raschet) [Text] / V. Yu. Aleksandrov, K. K. Klimovskii. – Moscow: Mashinostroenie, 2012. – 136 p.

2. Apparatus for the continous sulfuration of sugar-juices [Electronic resource]: Patent US 789372 A / Maguin A. – Filed March 4, 1904; Publ. May 9, 1905. – Available at: \www/URL: <https://www.google.com/patents/US789372>

3. Razladin, Yu. S. Spravochnoe posobie po ekonomii toplivnyh energoresursov na predpriatiiah pishchevoi promyshlennosti [Text]. Book 1. Proizvodstvo sahara / Yu. S. Razladin, S. Yu. Razladin. – Kyiv: Osvita Ukraina, 2010. – 582 p.



4. Vyskrebtsov, V. B. Utilizatsiia sernistogo angidrida i rashod sery [Text] / V. B. Vyskrebtsov // Sahar. – 2003. – No. 5. – P. 46–48.
5. Ponomarenko, V. Development of equipment and technological schemes to reduce emissions of sugar factory [Text] / V. Ponomarenko, N. Pushanko, N. Pushanko // Technology Audit and Production Reserves. – 2015. – Vol. 4, No. 4 (24). – P. 35–41. doi:[10.15587/2312-8372.2015.47018](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.47018)
6. Grebeniuk, S. M. Tehnologicheskoe oborudovanie saharnyh zavodov [Text] / S. M. Grebeniuk. – Moscow: KolosS, 2007. – 520 p.
7. Azrilevich, M. Ya. Oborudovanie saharnyh zavodov [Text] / M. Ya. Azrilevich. – Ed. 3. – Moscow: Legkaia i pishchevaia promyshlennost', 1982. – 392 p.
8. Ponomarenko, V. Ejection devices in mass transfer processes of sugar industry [Text] / V. Ponomarenko, N. Pushanko. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 56 p.
9. Tsegelskii, V. G. Dvuhfaznye struinye apparaty [Text] / V. G. Tsegelskii. – Moscow: MSTU n. a. N. E. Bauman, 2003. – 408 p.
10. Bouhanguel, A. Flow visualization in supersonic ejectors using laser tomography techniques [Text] / A. Bouhanguel, P. Desevaux, E. Gavignet // International Journal of Refrigeration. – 2011. – Vol. 34, No. 7. – P. 1633–1640. doi:[10.1016/j.ijrefrig.2010.08.017](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.08.017)
11. Riffat, S. B. Recent development in ejector technology – a review [Text] / S. B. Riffat, L. Jiang, G. Gan // International Journal of Ambient Energy. – 2005. – Vol. 26, No. 1. – P. 13–26. doi:[10.1080/01430750.2005.9674967](https://doi.org/10.1080/01430750.2005.9674967)
12. Kandakure, M. T. Hydrodynamic aspects of ejectors [Text] / M. T. Kandakure, V. G. Gaikar, A. W. Patwardhan // Chemical Engineering Science. – 2005. – Vol. 60, No. 22. – P. 6391–6402. doi:[10.1016/j.ces.2005.04.055](https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.04.055)
13. Li, C. Configuration dependence and optimization of the entrainment performance for gas–gas and gas–liquid ejectors [Text] / C. Li, Y. Li, L. Wang // Applied Thermal Engineering. – 2012. – Vol. 48. – P. 237–248. doi:[10.1016/j.applthermaleng.2011.11.041](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.041)
14. Cramers, P. H. M. Influence of the ejector configuration, scale and the gas density on the mass transfer characteristics of gas–liquid ejectors [Text] / P. H. M. Cramers, A. A. C. Beenackers // Chemical Engineering Journal. – 2001. – Vol. 82, No. 1–3. – P. 131–141. doi:[10.1016/s1385-8947\(00\)00363-6](https://doi.org/10.1016/s1385-8947(00)00363-6)
15. Park, B. H. Fluid dynamics in starting and terminating transients of zero-secondary flow ejector [Text] / B. H. Park, J. H. Lim, W. Yoon // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2008. – Vol. 29, No. 1. – P. 327–339. doi:[10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.06.008](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.06.008)
16. Method of sulfitation of sugar production fluids [Electronic resource]: Patent UA 39000 A / Vyskrebtsov V. B. – Appl. No. 2000127519; Filed December 26, 2000; Publ. May 15, 2001, Bull. No. 4. – Available at: \www/URL: <http://uapatents.com/4-39000-sposib-sulfitaci-ridin-cukrovogo-virobnictva.html>
17. Kislov, E. A. Optimizatsiia protsessa massoobmena v struinom apparate [Text] / E. A. Kislov, A. V. Sugak, D. O. Bytev, A. S. Gribanov // Izvestiia VUZov. Seriia «Himiia i himicheskaia tehnologiia». – 2005. – Vol. 48, No. 2. – P. 91–93.

18. Simakov, N. N. Krizis soprotivleniia kapel' pri perehodnyh chislah Reinol'dsa v turbulentnom dvuhfaznom potoke fakela raspyla mehanicheskoi forsunki [Text] / N. N. Simakov // Zhurnal tehniceskoi fiziki. – 2004. – Vol. 74, No. 2. – P. 46–51.

19. Simakov, N. N. Raschet soprotivleniia i teplootdachi shara obtekaiushchemu gazu v tsilindricheskom kanale [Text] / N. N. Simakov // Zhurnal tehniceskoi fiziki. – 2016. – Vol. 86, No. 9. – P. 32–38.

ТОЛЬКО ДЛЯ ЧТЕНИЯ