

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**БУЗОВСЬКИЙ ВІТАЛІЙ ПЕТРОВИЧ**



УДК 621.643

**РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНОГО КОНДЕНСАЦІЙНОГО МЕТОДУ  
ВЛОВЛЮВАННЯ ПАРІВ ЛЕГКИХ ФРАКЦІЙ НАФТОПРОДУКТІВ  
З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЖЕКЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ**

Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

м. Одеса, 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Одеській національній академії харчових технологій, Міністерство освіти і науки України.

**Науковий керівник**

кандидат технічних наук, доцент  
**Кологривов Михайло Михайлович,**  
Одеська національна академія харчових технологій,  
Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій  
та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського ОНАХТ,  
МОН України, доцент кафедри теплоенергетики та  
трубопровідного транспорту енергоносіїв.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Середюк Марія Дмитрівна,**  
Івано-Франківський національний  
технічний університет нафти і газу, МОН України,  
завідувач кафедри транспорту і зберігання  
нафти і газу;

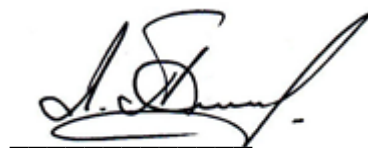
кандидат технічних наук  
**Яновський Сергій Романович,**  
ПАТ «Укртранснафта»,  
філія «Магістральні нафтопроводи «Дружба»,  
головний інженер (м. Львів).

Захист відбудеться 12 квітня 2018 року о 13 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий 27 лютого 2018р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04,  
кандидат технічних наук, доцент



Л.Д. Пилипів

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У наш час питанням енергетичної безпеки України приділяється все більш серйозна увага на всіх рівнях законодавчої і виконавчої влади. Зменшення втрат бензинів від випаровування – важливий напрям економії паливно-енергетичних ресурсів. Збиток, що завдають викиди парів, полягає не тільки у втраті цих ресурсів, але й у негативних екологічних наслідках. Особливо гостро ця проблема постає на об'єктах нафтопродуктозабезпечення, розташованих у межах великих міст, а саме – на автозаправних станціях (АЗС). Технологічні операції при видачі, прийомі і зберіганні нафти і нафтопродуктів супроводжуються їх втратами. Для їх зниження застосовують резервуари з понтонами і плаваючими дахами, споруджують системи для уловлювання легких фракцій нафтопродуктів (УЛФ) та застосовують резервуари спеціальних конструкцій. Абсорбційні (Іванов О.А., Беляєва З.Г.) та адсорбційні (John Zink company, ZEESCO, Inc.) системи УЛФ складні, компресійні (Dover Company) – капіталомісткі та пожежо- вибухонебезпечні. На базі конденсаційних систем багато пристроїв забезпечені рекуперативними теплообмінниками (Ольгін О.С., Єльчанінов М.О., Je-Lueng Shie, Chen-Yu Lu), недоліком яких є порівняно висока пожежо- та вибухонебезпека, збільшення термічного опору в процесі експлуатації та фіксована площа поверхні теплообміну. Для скорочення втрат від випаровування наряду з вище переліченими застосовуються різні технічні засоби: диски-відбивачі, газові обв'язки, газовирівнюючі системи та ін. Проте ефективність їх застосування не завжди висока.

З огляду на недоліки існуючих систем, перспективною представляється конденсаційна система УЛФ з використанням ежекційного пристрою. Ежекційні пристрої характеризуються високою пожежо- та вибухобезпекою, малою матеріаломісткістю та можливістю регулювання поверхні теплообміну в широкому діапазоні. Проте, впровадженню даних систем заважає відсутність єдиної теорії розрахунку теплообмінників ежекційного типу, і як наслідок нестача даних щодо оптимальних режимів експлуатації із забезпеченням максимально можливої ефективності вловлювання. Усе це, безумовно, говорить про актуальність проблеми розробки ефективного методу уловлювання парів нафтопродуктів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана згідно із «Основними положеннями енергетичної стратегії України на період до 2030 р.», прийняті Кабінетом Міністрів України 15.03.2006 р.; планом роботи з держбюджетної тематики кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв «Розробка і дослідження тепломасообмінних апаратів і теплових контурів для енерготехнологічних систем промислових виробництв».

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розробка фізико-технічних основ конденсаційного методу уловлювання легких фракцій нафти і нафтопродуктів з використанням ежекційного пристрою. Для її досягнення вирішувались наступні завдання:

1. Проведення теоретичних досліджень гідродинаміки горизонтального газо-

рідинного факелу, визначення впливу напрямку факелу (горизонтального або вертикального) на його форму і швидкість крапель.

2. Визначення шляхом математичного моделювання гідравлічної характеристики ежекційного апарату та дослідження впливу ежекційного ефекту на параметри нестационарного процесу зливання нафтопродукту в підземний резервуар АЗС.

3. Теоретичне дослідження процесів тепломасообміну з метою вивчення впливу вихідних умов на основні показники роботи апарату та отримання рекомендацій, які забезпечують розрахунок і конструювання ежекційних апаратів для даних систем УЛФ;

4. Розробка спрощеної методики теплового розрахунку ежекційного апарату, що узагальнює отримані експериментальні дані.

5. Техніко-економічний аналіз впровадження конденсаційної системи УЛФ з ежекційним пристроєм на об'єкті нафтопродуктозабезпечення.

**Об'єктом дослідження** є конденсаційна система УЛФ з використанням ежекційного пристрою та процес великого дихання резервуарів.

**Предметом** є гідродинаміка та тепломасообмін в ежекційному апараті в умовах конденсації парів нафтопродуктів на холодних краплях розсолу та газова динаміка пароповітряної суміші при її видаленні з резервуару.

**Метод дослідження:** математичне моделювання динаміки газорідного факелу, теплопереносу в контактних ежекційних теплообмінниках та нестационарного процесу витoku ППС з резервуару; аналітичне дослідження масопереносу в дифузійному шарі біля краплі кулястої форми; порівняльний аналіз різних моделей конденсації; методи числового оброблення даних; методи обчислювальної математики, які реалізовані шляхом алгоритмізації і програмування в сучасному математичному пакеті "MathCad"; експериментальне дослідження теплотехнічних показників роботи контактних теплообмінників; теорія подібності.

**Положення, що виносяться на захист.** Закономірності гідродинаміки і тепломасообміну при конденсації парів вуглеводнів на холодних краплях розсолу в апаратах ежекційного типу.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

*Вперше*

– завдяки чисельному розв'язанню систем диференціальних рівнянь збереження імпульсу, руху крапель рідини, збереження маси середовищ отримані локальні характеристики руху пароповітряної суміші і рідини через порожнину ежекційного апарату, що дозволило визначити вплив напрямку факелу на характеристики дисперсійного потоку;

– за допомогою методу математичного моделювання встановлено вплив теплообміну на швидкість дисперсійного потоку;

– виведена формула Стефана у сферичній системі координат для розрахунку густини потоку речовини в дифузійному пограничному шарі на межі розділу рідинної і газової фаз;

- встановлений вплив товщини дифузійного пограничного шару на температуру охолодження пароповітряної суміші;

- в ході чисельного експерименту з використанням математичної моделі тепломасообміну встановлений вплив витрати рідини та пароповітряної суміші на ефективність вловлювання;

- визначений внесок стінок апарату і краплєвловлювача в загальну ефективність вловлювання при конденсації парів вуглеводнів;

- отримане критеріальне рівняння інтенсивності тепломасообміну, що узагальнює дані експериментальних досліджень і встановлює зв'язок між вхідними і вихідними параметрами середовищ;

**Практична та наукова значимість отриманих результатів полягає у наступному:**

- розроблена оригінальна конденсаційна система УЛФ з ежекційним пристроєм, який відрізняється низькою металоємністю, пожежо- та вибухобезпекою, низьким гідравлічним опором, високою ефективністю вловлювання.

- розроблено методику розрахунку гідродинаміки факелу в горизонтальному ежекційному конденсаторі парів нафтопродуктів;

- розроблено методику теплового розрахунку ежекційного апарату зі складною гідродинамічною картиною;

- запропоновано аналітичну формулу для розрахунку густини потоку речовини стосовно сферичної системи координат, яка може використовуватися для розрахунку масообміну в процесах конденсації і випаровування, які мають місце в контактних апаратах форсункового типу;

- на основі отриманих експериментальних даних розроблено інженерну методику розрахунку конденсаційної системи УЛФ з ежекційним пристроєм, яку рекомендовано для використання в магістерських роботах і дипломних проектах, а також в учбовому процесі на кафедрах ОНАХТ у курсах лекцій і практичних занять студентів спеціальності 7.05030402, 8.05030402 "Газонафтопроводи та газонафтосховища".

- результати досліджень можуть використовуватися при розробці дослідного зразка конденсаційної системи УЛФ з ежекційним пристроєм.

- впровадження результатів роботи на підприємствах нафтопродуктозабезпечення дозволяє значно скоротити втрати від випаровування і, як наслідок, поліпшити економічні показники зберігання і транспортування палива, зберегти його якість, а також зменшити негативний вплив на природне середовище.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. В опублікованих роботах автором особисто:

- в ході математичного моделювання гідродинаміки ежекційного апарату отриманні локальні характеристики факелу із врахуванням впливу процесів тепломасообміну [1, 2];

- в ході експериментальних досліджень тепломасообміну в ежекційному

апараті при конденсації парів вуглеводнів на краплях розсолу встановлений зв'язок між початковою температурою розсолу і кінцевою температурою пароповітряної суміші [3];

- на основі отриманих експериментальних даних знайдений вигляд рівняння інтенсивності тепломасообміну, що зв'язує початкові і кінцеві параметри середовищ при конденсації парів вуглеводнів на холодних краплях водного розчину хлориду кальцію [4];

- в результаті розгляду механізмів конвективної і молекулярної дифузії виведена формула Стефана у сферичній системі координат для розрахунку густини потоку речовини [5, 6];

- розроблена конструкція ежекційного апарату і схемне рішення конденсаційної системи УЛФ [7, 8].

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** підтверджується коректною постановкою методики теоретичних досліджень та їх адекватним описом, а також результатами порівняння розрахункових величин з новою емпіричною інформацією.

**Апробація результатів дисертації** проводилася на XII Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та студентів (м. Одеса, 2012 р.), Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, «Стан, досягнення, і перспективи холодильної техніки і технології» (м. Одеса, 2013 р.), IX Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» (м. Одеса, 2013 р.), XV Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми енергетики і екології» (м. Одеса, 2013 р.), Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Еколого-енергетичні проблеми сучасності» (м. Одеса, 2014 р.), Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології» (м. Одеса, 2014 р.), Міжнародній науково-технічній конференції "Нафтогазова освіта та наука: стан та перспективи" (м. Івано-Франківськ, 2014 р.), Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених, аспірантів та студентів "Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології" (м. Одеса, 2015 р.), X Міжнародній науково-технічній конференції: "Сучасні проблеми холодильної техніки і технології" (м. Одеса, 2015 р.), XVI Всеукраїнській науково-технічній конференції "Актуальні проблеми енергетики та екології" (м. Одеса, 2016 р.).

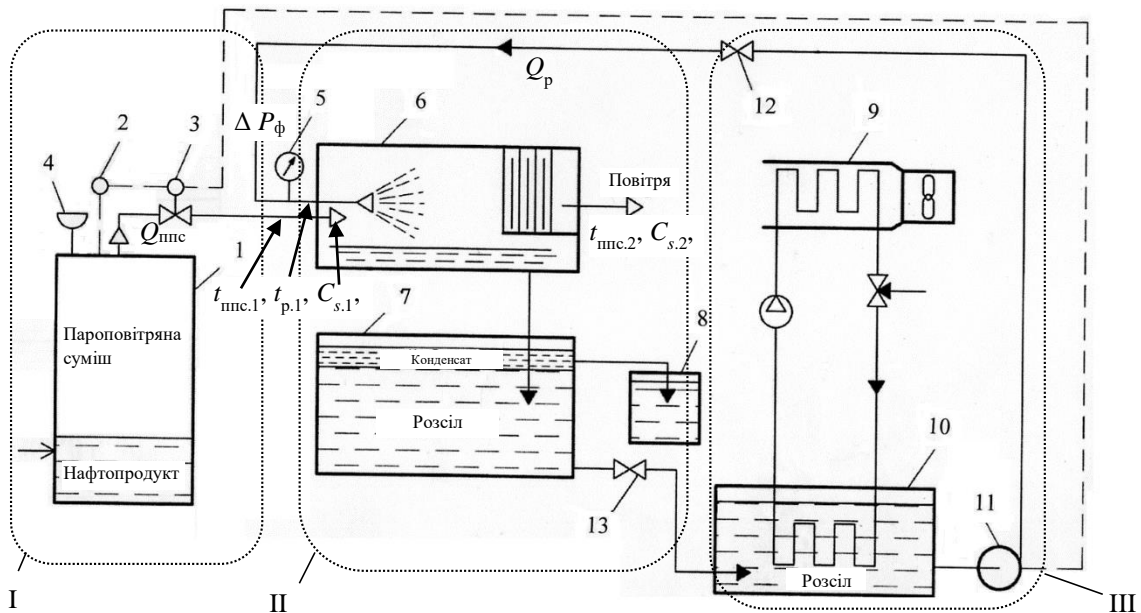
**Публікації.** Основні наукові і прикладні результати автора представлені у 6 публікаціях в науково-технічних фахових журналах (з них одна, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus), які відповідають вимогам ДАК МОН України до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, та отримано 2 патенти на корисну модель.

**Об'єм і структура дисертації.** Дисертація викладена на 164 сторінках друкованого тексту, містить 67 рисунків, 29 таблиць, і складається із вступу, 5 основних розділів, висновків і списку літератури із 101 найменування.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

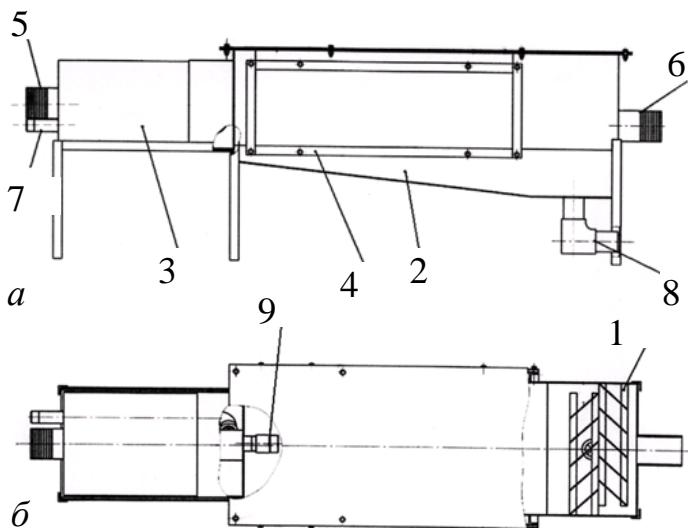
У першому розділі виконаний аналіз сучасного стану методів і засобів скорочення викидів нафти і нафтопродуктів від випаровування із резервуарів.

Виконаний огляд систем, які передбачають встановлення рекуперативного теплообмінника на даху резервуару або за його межами. Встановлено, що їх недоліком є ймовірність виникнення пожежі при стіканні конденсату, що контактує з ППС. Пропонується система, яка позбавлена вище згаданих недоліків (рис. 1).



1 – ємність з нафтопродуктом; 2 – датчик тиску; 3 – відсічний клапан; 4 – дихальний клапан; 5 – манометр; 6 – ежекційний апарат; 7 – відстійник; 8 – ємність для збору конденсату; 9 – холодильна машина; 10 – випарник; 11 – насос

**Рисунок 1** – Конденсаційна система УЛФ з ежекційним пристроєм



*a* – вигляд спереду; *б* – вигляд зверху

**Рисунок 2** – Ежекційний конденсатор контактного типу для уловлювання парів нафтопродуктів

Принципову схему конденсаційної системи УЛФ (рис. 1) з використанням ежекційного пристрою (рис. 2) за функціональними ознаками можна розділити на три зони. В зоні I розташований резервуар з датчиками, що забезпечують вмикання розсільного насосу 11 і відкриття відсічного клапану 3. В зоні II розташований ежекційний теплообмінник, в якому на холодних краплях розсолу відбувається конденсація парів нафтопродукту. У ємності 7 конденсат відстоюється. Зона III призначена для охолодження розсолу.

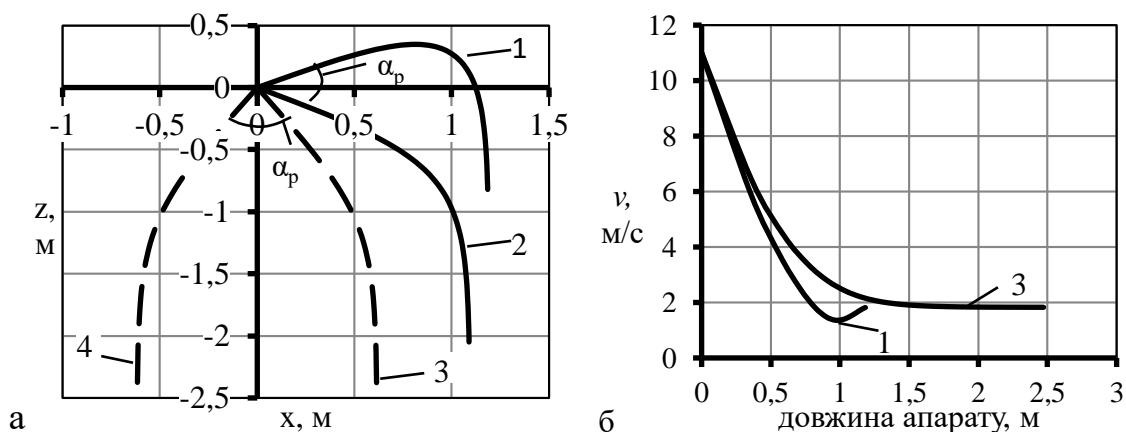
Ежекційний конденсатор складається з наступних елементів : патрубок подачі ППС 5, патрубок подачі розсолу 7; вхідний пристрій 3, корпус 2, патрубок виходу ППС 6, патрубок виходу розсолу і конденсату 8, смотрове вікно 4, форсунка 9, краплевловлювач 1. Основними перевагами теплообмінника даного типу є: неможливість виникнення статичної електрики в рухомому потоці розсолу, можливість регулювання поверхні теплообміну в широкому діапазоні, невеликий гідравлічний опір та невисока матеріаломісткість системи.

У **другому** розділі виконане математичне моделювання гідродинаміки в ежекційному конденсаторі бензинових парів. Для опису гідродинамічної картини запропонований феноменологічний підхід. Даний підхід на основі моделі роздільної течії було використано в роботі Пажі Д.Г. та Галустова В.С. при виведенні математичної моделі гідродинаміки в прямоточному апараті з вертикальним напрямком факелу. Нами запропонована змінена математична модель з урахуванням конструктивних особливостей апарату, в якому газорідний факел направлений горизонтально. Основна відмінність гідродинаміки горизонтального факелу від гідродинаміки вертикального полягає у відмінності форми факелу і швидкості руху крапель. Дані відмінності продемонстровані завдяки аналізу результатів рішення рівняння руху краплі з врахуванням сили опору повітря, що у проекції на координатні вісі має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = -\frac{k}{m} \sqrt{v_x^2 + v_z^2} \cdot v_x \\ \frac{dv_z}{dt} = -g - \frac{k}{m} \sqrt{v_x^2 + v_z^2} \cdot v_z \end{cases}; \quad \begin{cases} \frac{dx}{dt} = v_x \\ \frac{dz}{dt} = v_z \end{cases}, \quad (1)$$

де  $v_x$ ,  $v_z$  – швидкість краплі у проекції на координатні вісі  $x$  та  $z$ ;  $m$  – маса краплі, кг;  $k$  – коефіцієнт.

Результати моделювання руху краплі розсолу представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 3.



а) траєкторія руху краплі при різних кутах нахилу початкового вектора швидкості до осі  $x$ ; б) графік зміни абсолютної величини вектора швидкості краплі по довжині апарату; початковий кут нахилу вектора швидкості до осі  $x$ : 1 –  $30^\circ$ ; 2 –  $-30^\circ$ ; 3 –  $-60^\circ$ ; 4 –  $-120^\circ$

**Рисунок 3** – Параметри руху краплі розсолу



Завдяки рис. 3, а показано, що при однакових кутах розкриття  $\alpha_p = 60^\circ$  горизонтальний та вертикальний факели мають різну форму. Показано, що і швидкості крапель горизонтального та вертикального факелів будуть відрізнятися (рис. 3, б).

Як один із етапів розробки моделі гідродинаміки факела в ежекційному апараті розглянена гідродинаміка вільного факелу. Вважається, що імпульс сили, що втрачає рідина, повністю сприймає газова фаза у факелі:

$$\frac{d\overline{\Delta_{rj}}}{dt} = -\overline{F_{cj}}, \quad (2)$$

де  $\Delta_{rj}$  – потік імпульсу газу, що сприймається від  $j$ -тої струминки.

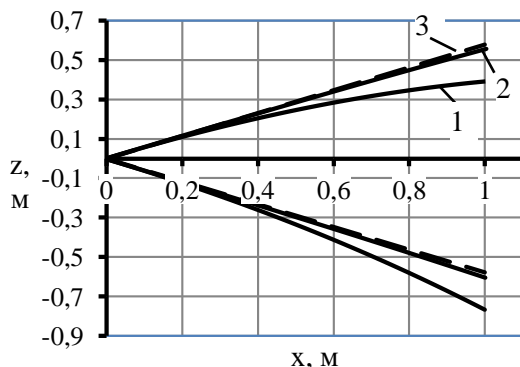
На рис. 4 представлено результати розрахунків для вільного факелу, який утворився при розпилюванні 25,7 % водного розчину хлористого кальцію у повітряне середовище, яке має температуру 15 °С. Розрахунки проводяться при трьох варіантах перепаду тиску. Відповідно цьому міняється пропускна здатність форсунки і заутеровський діаметр краплі  $d_{32}$  (таблиця 1).

**Таблиця 1** - Параметри роботи форсунки

Параметр роботи форсунки	Варіант розрахунку		
	1	2	3
Перепад тиску на форсунці, атм.	0,8	3,0	11,0
Продуктивність форсунки, м <sup>3</sup> /год	0,391	0,700	1,240
Діаметр крапель $d_{32}$ , мм	0,660	0,370	0,209

Вважається, що тепломасообмін між фазами не відбувається. Здійснюється гідравлічне розпилювання форсункою з діаметром соплового отвору  $d_c = 4,55$  мм.

Кут розкриття  $\alpha_p$  складає  $60^\circ$ . Вважається також, що густина зрошення розподілена рівномірно по перерізу факела. Варіантам розрахунку 1, 2, 3 відповідають початкові швидкості рідини 6,2, 11,2, 19,8 м/с відповідно. При швидкостях рідини більше 19 м/с профіль факелу, при його довжині до 1 м, з достатньою для інженерних розрахунків точністю може вважатися конічним (штрихові утворюючі, рис. 4). Відхилення площі перерізу реального факелу від конічного складає не більше 15 %. У цьому випадку швидкість крапель рідини можна вважати сталою по довжині факелу, тому рівняння руху може бути виключене із системи рівнянь.



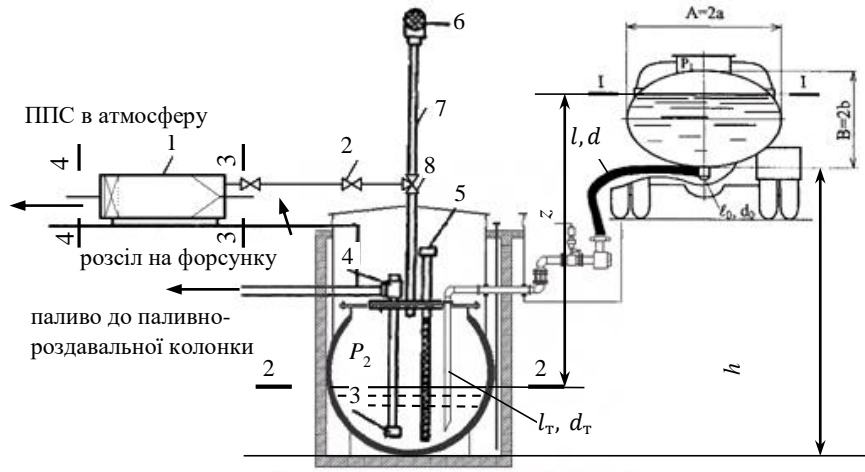
**Рисунок 4** – Вигляд профілю вільного факелу

Моделювання гідродинаміки вільного факелу також дозволяє виявити закономірності руху газової фази, проникнення газу через бічну поверхню факелу та інше.

Виконане дослідження параметрів ППС при диханнях резервуарів. Зливання нафтопродукту та видалення ППС характеризуються зміною параметрів у часі, тобто процес є нестационарним. При проектуванні системи УЛФ найбільший інтерес представляють такі параметри, як витрата ППС і концентрація парів.

Для їх визначення розроблена математична модель процесу великого дихання резервуару. В даній моделі спільно вирішені задачі гідравлічного розрахунку зливання нафтопродукту, газодинамічного розрахунку витoku ППС із резервуару з врахуванням підключеного ежекційного апарату і розрахунку втрат нафтопродукту при великому диханні. До теперішнього часу деякі з цих задач вирішувались лише окремо.

Схема до газодинамічного розрахунку витoku ППС представлена на рис. 5.



1 – ежекційний апарат; 2 – клапан з датчиком тиску; 3 – клапан приймальний; 4 – кутовий протививбуховий пристрій; 5 – замірний пристрій; 6 – клапан дихальний; 7 – труба дихального клапану; 8 – трійник

**Рисунок 5** – Принципова схема АЗС з підключеним до резервуару ежекційним апаратом

Маса видаленої ППС за час  $dt$ :

$$dm_1 = -f_{\text{тр}} \cdot \phi \cdot \sqrt{\rho_{\text{кр}} \cdot P_2} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \left( \left( \frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)} dt, \quad (3)$$

де  $f_{\text{тр}}$  – площа перерізу дихального трубопроводу 11 (рис. 5);  $\phi$  – коефіцієнт швидкості;  $\rho_{\text{кр}}$  – густина ППС біля кривлі;  $P_2, P_3 = P_{\text{ат}} - P_{\text{еж}}(Q_{\text{ппс}})$  – абсолютний тиск в перерізі 2-2 та 3-3 відповідно;  $k$  – коефіцієнт адиабати;  $P_{\text{еж}}(Q_{\text{ппс}})$  – повний напір, який створює ежекційний апарат.

Зміну маси вуглеводнів  $dm_y$  у газовому просторі за час  $dt$  можна представити як суму маси вуглеводнів, яка випарувалася в газовий простір і вуглеводнів, які були видалені через дихальний трубопровід:

$$dm_y = c_{\text{м.кр}} \cdot dm_1 + dm_2, \quad (4)$$

де  $c_{\text{м.кр}}$  – масова концентрація ППС біля кривлі;  $dm_2$  – маса вуглеводнів, яка випарувалася у газовий простір резервуару за час  $dt$ .

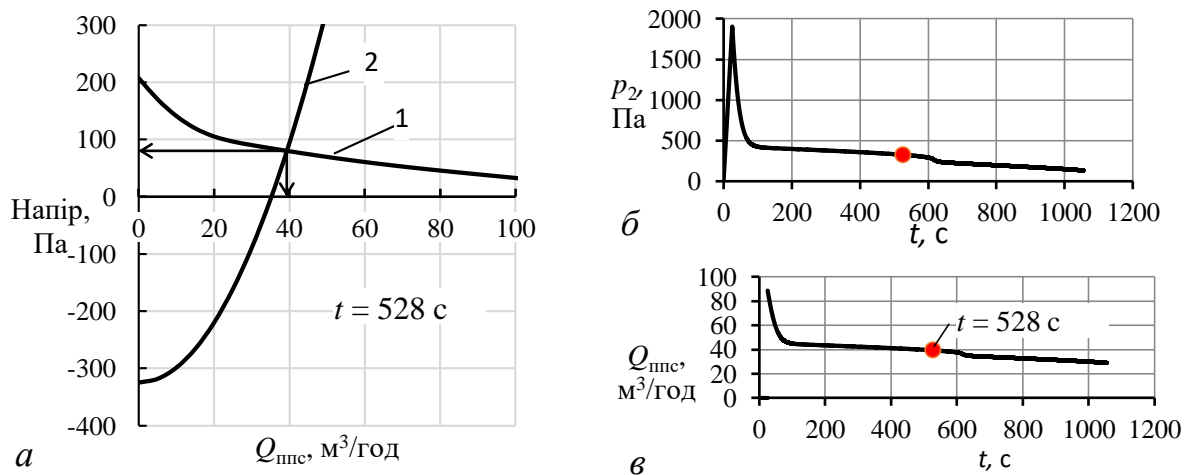
Доповнюють математичну модель видалення ППС рівняння зміни: різниці рів-

нів рідини в резервуарі та в цистерні, тиску в резервуарі, середньої густини ППС у газовому просторі резервуару, молекулярної маси ППС, об'ємної концентрації ППС у резервуарі, масової концентрації ППС у резервуарі, рівнянням зміни маси ППС у резервуарі, та рівнянням зміни маси парів вуглеводнів, які випаровуються в газовий простір.

Чисельний розв'язок задачі про зливання бензину у підземний резервуар АЗС виконаний для наступних умов: тип резервуару – РГС 25; модель автобензовозу – АЦ-1-260; об'єм бензину, який зливається –  $10 \text{ м}^3$ ; вакуум спрацювання дихального клапану цистерни,  $p_{\text{КВ}} = 250 \text{ Па}$ ; густина бензину,  $\rho_b = 740 \text{ кг/м}^3$ ; температура газового простору  $283 \text{ К}$ ; тиск насичених парів бензину по Рейду,  $P_R = 57000 \text{ Па}$ ; початкова об'ємна концентрація парів бензину у газовому просторі  $C_0 = 0,2 \frac{\text{м}^3(\text{парів})}{\text{м}^3(\text{ППС})}$ .

До резервуару через дихальний трубопровід підключений ежекційний апарат. Витрата розсолу складає  $0,7 \text{ м}^3/\text{год}$ , перепад тиску на форсунці  $0,3 \text{ МПа}$ .

Згідно з результатами чисельного розрахунку загальний час зливання  $\tau_z$  складає  $1056 \text{ с}$  ( $17,6 \text{ хв.}$ ). По мірі зливання протягом перших 25 секунд (рис. 6, б) надлишковий тиск в резервуарі збільшується від нуля до  $1900 \text{ Па}$  – величини налаштування дихального клапану. У момент, коли тиск в резервуарі зрівняється з величиною тиску налаштування дихального клапану, останній відкриється і почнеться викид ППС. Цьому моменту відповідає максимальна витрата ППС (рис. 6, в).



а) робоча точка ежекційного апарату; б) зміна надлишкового тиску в підземному резервуарі 2; в) зміна об'ємної витрати ППС

**Рисунок 6** – Параметри зливання бензину

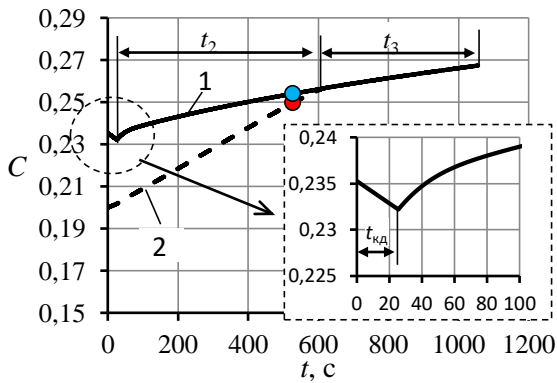
На рисунку рис. 6, а відкладена гідравлічна характеристика трубопроводів, які з'єднують апарат з резервуаром (крива 2), і напірна характеристика апарату (крива 1). Для даних умов повний напір апарату дорівнює величині вакууму  $p_3$  на його всмоктувальному патрубку.

Як видно з рис. 6, а ежекційний апарат створює напір лише у десятки і сотні паскаль (крива 1). При густині бензину  $740 \text{ кг/м}^3$  напору ежекційного апарату у  $200 \text{ Па}$  відповідає стовп бензину висотою  $28 \text{ мм}$ , що значно менше, ніж різниця між рів-

нями бензину в цистерні і в резервуарі, яка вимірюється метрами. З цього можна зробити висновок, що ежекційний ефект дуже малий і практично не впливає на час зливання бензину.

Інтенсивність випаровування може зрости при зменшенні абсолютного тиску в резервуарі. Оскільки величина абсолютного тиску на три порядки більша напору ежекційного апарату, можна зробити висновок про те, що ежекційний ефект також не впливає і на інтенсивність випаровування бензину протягом зливання.

Протягом перших  $t_{кд} = 25$  с об'ємна концентрація вуглеводнів насиченої ППС біля поверхні бензину зменшується (крива 1 на рис. 7) внаслідок збільшення тиску на цьому часовому інтервалі. Далі ця величина зростає в більшій мірі через зростання



**Рисунок 7** – Зміна об'ємної концентрації ППС протягом часу зливання

об'єму бензину по відношенню до об'єму ППС у газовому просторі резервуару.

Зростання середньої по висоті газового простору об'ємної концентрації визначається кривою 2 (рис. 7). На часовому інтервалі  $t_3$  середня концентрація дорівнює концентрації біля поверхні бензину, тобто газовий простір повністю насичений парами вуглеводнів. На цьому часовому інтервалі внаслідок малої рухомої сили масообміну випаровування уповільнюється.

Розрахунок втрат нафтопродукту при великому диханні при початковій об'ємній концентрації  $C_{ср} = 0,2$  дає результат по втратах 7,28 кг, що на 9% менше, ніж експериментальна величина втрат А.В. Кулагіна.

**Третій розділ** присвячений дослідженню тепломасообміну в ежекційному апараті. Теплообмінний розрахунок має наступні особливості: одночасно з пароповітряної суміші конденсуються пари декількох вуглеводнів і водяні пари в присутності повітря, яке не конденсується; внаслідок витіснення ППС з резервуара зберігання нафтопродукту і ежекційного ефекту, який створює факел розпилу, теплообмін в апараті розглядається як при вимушено-ежекційній конвекції. Крім того, теплообмін ускладнений масообміном, в основі якого лежать різні механізми – концентраційна і конвекційна дифузія. Розроблена математична модель тепломасообміну, яка дозволяє визначати локальні характеристики середовищ по всій довжині робочої зони апарату. Диференційне рівняння зміни температури рідини по довжині апарату виводиться виходячи з рівняння теплового переносу при теплообміні між ППС і краплею розсолу. Кінцевий результат представлений нижче:

$$\frac{dT_{ж}}{dx} = \frac{6Nu\lambda_{пвс}(T_{г.ф} - T_{ж})}{d^2 C_p \rho_{ж} \omega_{ж}} + \frac{3L_y \rho_{конд.у}}{d C_p \rho_{ж}} \frac{d(d_{к.у})}{dx} + \frac{3L_v \rho_{конд.в}}{d C_p \rho_{ж}} \frac{d(d_{к.в})}{dx}, \quad (5)$$

де  $Cp_{ж}$  – питома масова теплоємність рідини, Дж/(кг·К);  $T_{ж}$  – температура рідини, К;  $Nu$  – тепловий критерій Нуссельта;  $\lambda_{пвс}$  – коефіцієнт теплопровідності ППС, Вт/(м·К);  $T_{г.ф}$  – температура ППС у факелі, К;  $L_y$ ,  $L_b$  – питома теплота конденсації парів вуглеводнів і води відповідно, Дж/кг;  $\rho_{конд.у}$ ,  $\rho_{конд.в}$  – густина сконденсованих вуглеводнів і води відповідно, кг/м<sup>3</sup>;  $d(d_{к.у})$ ,  $d(d_{к.в})$  – приріст діаметра краплі при конденсації парів вуглеводнів і води відповідно;  $\omega_{ж}$  – швидкість крапель рідини.

Виходячи з рівняння балансу маси при конденсації парів на краплях рідини рівняння зміни діаметру крапель по довжині апарату має вигляд:

$$\frac{d(d_{к.})}{dx} = \frac{2J_{п.гр}}{\rho_{конд.}\omega_{ж}}, \quad (6)$$

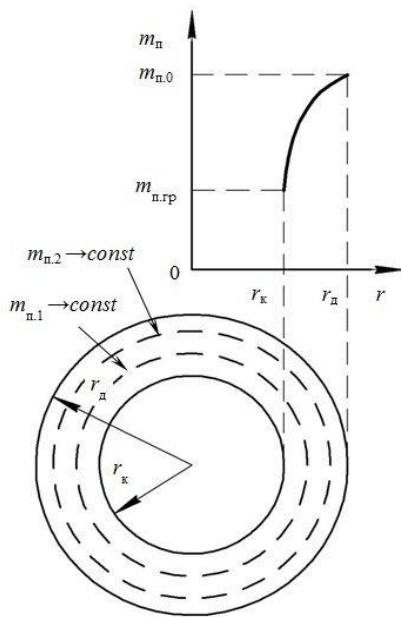
де  $J_{п.гр}$  – густина потоку парів на поверхні фазового переходу.

Рівняння теплового балансу:

$$G_{ж} Cp_{ж} \frac{dT_{ж}}{dx} + \frac{dQ_{ст}}{dx} = -G_b Cp_b \frac{dT_{г.ф}}{dx} + \frac{dG_{м.у}}{dx} L_y + \frac{dG_{м.в}}{dx} L_b, \quad (7)$$

де  $G_{ж}$ ,  $G_b$  – масова витрата рідини та повітря відповідно, кг/с;  $Q_{ст}$  – кількість тепла, яке передане стінкам апарату, Вт;  $Cp_b$  – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·К);  $G_{м.у}$ ,  $G_{м.в}$  – масова витрата конденсату вуглеводнів і води відповідно, кг/с.

Ліва частина рівняння (7) виражає кількість тепла, яке отримує розсіл і стінки апарату, а права частина виражає суму кількості тепла, яке віддає повітря, та тепла, яке утворюється при конденсації парів води і вуглеводнів.



**Рисунок 8** – До пояснення прийнятої моделі масообміну

Для розрахунку густини потоку парів  $J_{п.гр}$  використовується підхід, в основі якого лежить гіпотеза про дифузійний, тепловий та динамічний пограничні шари ППС біля поверхні краплі. Шари мають однакову товщину і нерухомі, а сили в'язкості, які спрямовані поперечно до дифундууючої маси компонентів суміші відсутні.

Зміна концентрації парів від величини  $m_{п.0}$  до  $m_{п.гр}$  відбувається в межах товщини дифузійного пограничного шару, який заключений між сферичними поверхнями з радіусами  $r_k$  та  $r_d$  (рис. 8). Має місце переміщення парів в бік поверхні краплі внаслідок концентраційної дифузії і *стефанового* потоку ППС, який характеризує конвективну дифузію.

Зміна концентрації парів  $m_{\text{п}}$  в зазначеному шарі при відсутності сил в'язкості описується одновимірним нестационарним рівнянням дифузії, яке записане в сферичній системі координат:

$$\frac{\partial m_{\text{п}}}{\partial \tau} + \omega_r \frac{\partial m_{\text{п}}}{\partial r} = D \left( \frac{\partial^2 m_{\text{п}}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial m_{\text{п}}}{\partial r} \right), \quad (8)$$

де  $m_{\text{п}}$  – масова концентрація вуглеводнів в ППС, яка є функцією часу і радіуса краплі, кг(парів)/кг(ППС);  $\tau$  – час, с;  $D$  – коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/с;  $r$  – радіус, м;  $\omega_r$  – швидкість стефанового потоку, м/с.

Вважаючи процес дифузії стаціонарним ( $\partial m_{\text{п}} / \partial \tau \equiv 0$ ), вирішення рівняння (8) спільно з рівняннями балансу потоку повітря і парів, і враховуючи граничні умови (рис. 8), отримуємо формулу *стефана* для визначення густини потоку парів на поверхні міжфазового переходу стосовно до сферичної системі координат:

$$J_{\text{п.гр}} = \frac{-\rho_{\text{пвс}} D}{m_{\text{п.гр}} - 1} \frac{C_1 C_4}{2r_{\text{к}}^2 \sqrt{1 - \frac{C_4}{r_{\text{к}}}}}, \quad (9)$$

де  $C_1, C_4$  – константи загального рішення диференційного рівняння;  $\rho_{\text{пвс}}$  – густина ППС, кг/м<sup>3</sup>.

$$C_1 = \frac{m_{\text{п.гр}} - 1}{\sqrt{1 - \frac{C_4}{r_{\text{к}}}}}; \quad C_4 = \frac{r_{\text{д}} r_{\text{к}} \left( 1 - \left( \frac{m_{\text{п.0}} - 1}{m_{\text{п.гр}} - 1} \right)^2 \right)}{r_{\text{к}} - r_{\text{д}} \left( \frac{m_{\text{п.0}} - 1}{m_{\text{п.гр}} - 1} \right)^2}, \quad (10)$$

Як альтернативу для розрахунку густини потоку речовини  $J_{\text{п.гр}}$  використовують також метод аналогії процесів тепло- та масообміну. Густина потоку маси визначається по співвідношенню, яке аналогічне закону Ньютона-Ріхмана. Для розрахунку дифузійного числа Нусельта використовують формулу Фреслінга (Frösling):

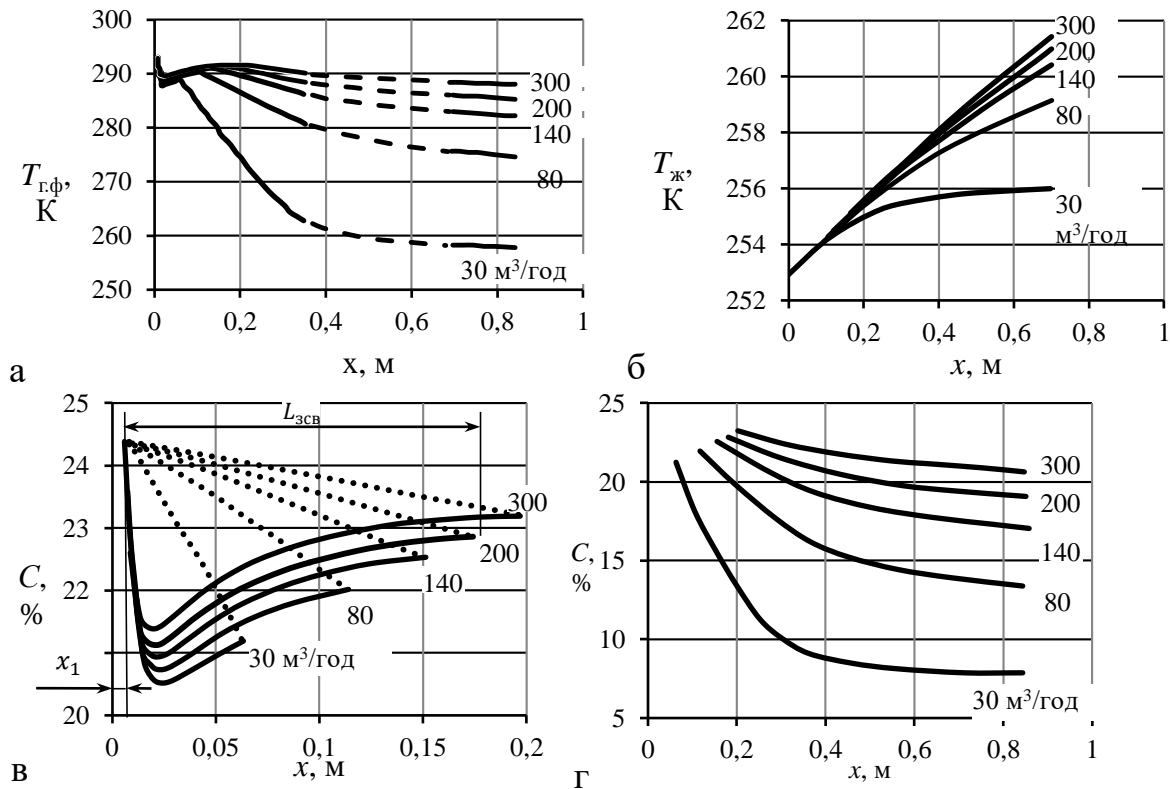
$$\text{Nu}_{\text{D}} = 2 + 0.55 \text{Re}^{0.5} \text{Sc}^{0.33}, \quad (11)$$

де  $\text{Sc} = \nu_{\text{ппс}} / D$  – число Шмідта.

На рис. 9 представлені розрахункові значення параметрів тепломасообміну в ежекційному апараті при конденсації парів бензину на краплях розсолу.

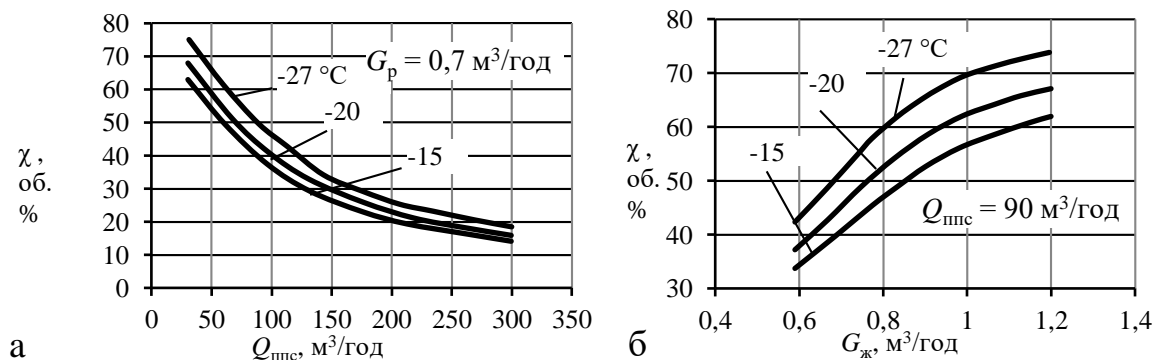
Розрахунки густини потоку речовини  $J_{\text{п.гр}}$  проводились за формулою Стефана (9). В полі графіків (рис. 9) приведений вплив зміни об'ємної витрати ППС на інші характеристики. При цьому витрата розсолу складає 0,7 м<sup>3</sup>/год. На рис. 9, а слід виділити дві характерні ділянки, на яких знаходяться перегини кривих. На першій ді-

лянці температура ППС різко падає через малий поперечний переріз факела і відповідно малу частку в ньому ППС. Потім ежекція ППС всередину факела зростає швидше, ніж здійснюється відведення теплоти від ППС до краплі рідини. На цій ділянці локальна температура ППС всередині факела зростає до значення меншого, ніж вихідна температура. Цьому явищу відповідає і збільшення локальної об'ємної концентрації парів в факелі (рис. 9, в). Слід зазначити, що середнє значення об'ємної концентрації парів, розраховане на весь перетин апарату може тільки зменшуватися (пунктирні криві на рис. 9, в).



а - зміна температури ППС по довжині апарату; б - зміна температури розсолу по довжині апарату; зміна локальної об'ємної концентрації парів вуглеводнів по довжині зони вільного факела (в), в зоні циркуляції і обмеженого течії (г)

**Рисунок 9** – Дослідження характеристик тепломасообміну при різних значеннях витрати ППС

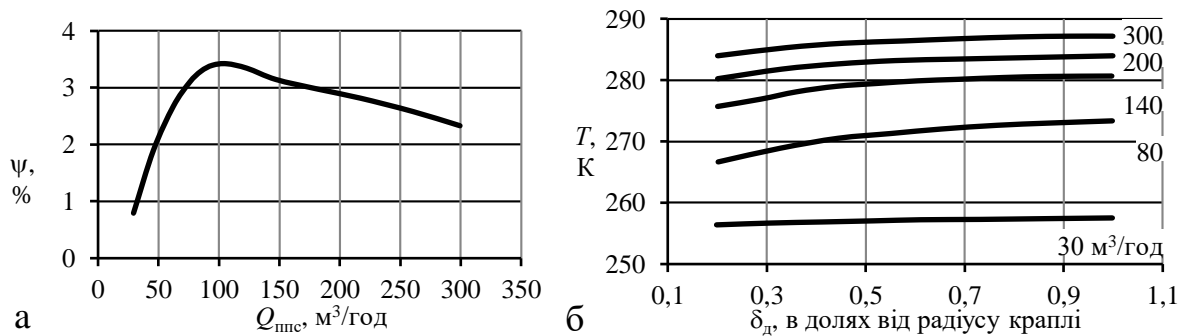


**Рисунок 10** – Графік залежності ефективності очищення повітря від витрати ППС (а) і витрати розсолу (б) при різних температурах розсолу

Рис. 9, з показує, що збільшення довжини апарату до значень більше 0,8 м не призводить до помітного зниження температури ППС на виході з нього.

З цього випливає висновок про те, що з метою зниження матеріальних витрат доцільно проектувати дані апарати із загальною довжиною до 1,5 м.

Графіки на рис. 10 ілюструють ефективність роботи апарату по вловлюванню парів нафтопродукту при зміні робочих навантажень. Результати дослідження внеску стінок і поверхонь краплевловлювача на тепломасообмін в ежекційному апараті показали, що лише до 3,5% тепла передається стінкам апарату, решта тепла від ППС передається краплям розсолу (рис. 11, а).

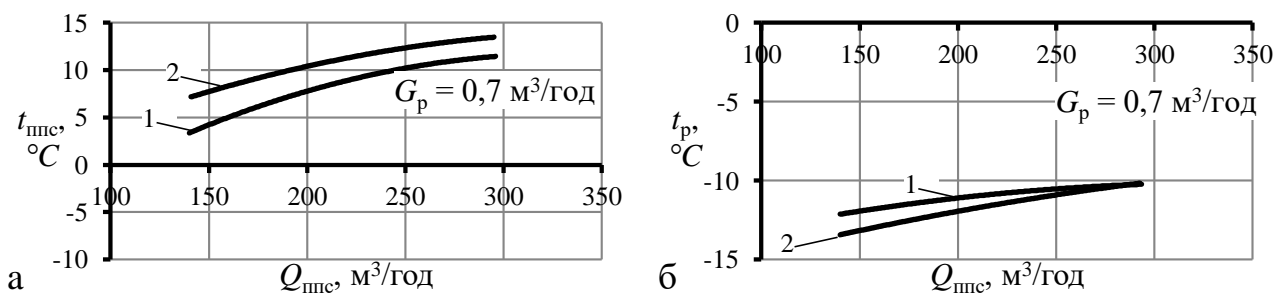


а – оцінка внеску стінок апарату і поверхонь краплевловлювача в тепломасообмін при зміні витрати ППС; б – залежності температури охолодженої ППС від товщини дифузійного пограничного шару при варіації витрати ППС

**Рисунок 11** – Дослідження впливу різних факторів на тепломасообмін в ежекційному апараті

На рис. 11, б показано, що чим менша товщина  $\delta_d = r_d - r_k$  дифузійного пограничного шару, тим температура охолодження ППС буде меншою.

Порівняння моделей конденсації (рис. 12) виконане при варіації витрати ППС. Як показує рис. 12 розбіжність результатів розрахунків за формулами Фреслінга і Стефана складають до 20 %.



а – залежність кінцевої температури ППС від її об'ємної витрати; б – залежність кінцевої температури розсолу від об'ємної витрати ППС; 1 – математична модель (формула Фреслінга); 2 – математична модель (формула Стефана (9))

**Рисунок 12** – Порівняння моделей конденсації при варіації витрати ППС



У четвертому розділі представлені результати експериментальних досліджень тепломасообміну в ежекційному апараті (таблиця 2), які отримані на установці, виготовленої в ОНАХТ. Охолодження ППС здійснювалося 19% водним розчином  $CaCl_2$  (температура замерзання  $-16\text{ }^\circ\text{C}$ ). Визначення концентрації ППС здійснювалося за її температурою. Цей підхід є обґрунтованим за умови, що пари вуглеводнів знаходяться в насиченому стані, коли кожній температурі відповідає одне значення тиску насичених парів при даному співвідношенні об'ємів парової  $V_n$  і рідинної фази  $V_p$ . Таким чином, концентрація насичених парів визначається за формулою:

$$C_s = \frac{P_s}{P_{\text{абс}}}, \quad (12)$$

де  $P_s$  – тиск насичених парів, Па;  $P_{\text{абс}}$  – абсолютний тиск, Па.

Визначення тиску насичених парів  $P_s$  здійснювалось за загальновідомою формулою:

$$P_s = 1,22 \cdot P_R \cdot e^{-0,034 \cdot (311-t)} \cdot F(V_n/V_p), \quad (13)$$

де  $P_R$  – тиск насичених парів по Рейду, Па;  $t$  – температура ППС, К;  $F(V_n/V_p)$  – функція, яка залежить від відношення  $V_n/V_p$ .

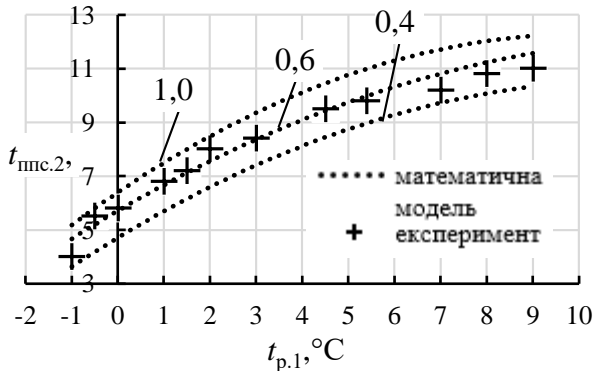
Тиск насичених парів по Рейду  $P_R$  залежить від компонентного і фракційного складу нафтопродукту. Визначення цієї величини здійснювалось нами експериментально за допомогою бомби Рейда і термостату, який підтримував температуру насичених парів в бомбі на рівні  $37,8\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Таблиця 2** – Результати експериментальних досліджень тепломасообміну в ежекційному апараті при конденсації парів бензину на краплях розсолу

Температура ППС на вході $t_{\text{ппс.1}}$ , $^\circ\text{C}$ (рис. 1)	Температура ППС на виході $t_{\text{ппс.2}}$ , $^\circ\text{C}$	Концентрація парів на вході $C_{s,1}$ , $\text{м}^3(\text{парів})/\text{м}^3(\text{ППС})$	Концентрація парів на виході $C_{s,2}$ , $\text{м}^3(\text{парів})/\text{м}^3(\text{ППС})$	Ефективність вловлювання $\frac{C_{s,1} - C_{s,2}}{C_{s,1}} \cdot 100, \%$	Об'ємна витрата ППС $Q_{\text{ппс}}$ , $\text{м}^3/\text{год}$	Об'ємна витрата розсолу $Q_p$ , $\text{м}^3/\text{год}$	Температура розсолу на вході, $t_{p,1}$ , $^\circ\text{C}$	Діаметр сопла форсунки, $d_c$ , мм	Перепад тиску на форсунці $\Delta P_\phi$ , МПа	Тиск насичених парів по Рейду $P_R$ , Па
16,0	11,0	0,307	0,259	15,5	2,1	1,22	9,0	5,0	0,09	53600
	10,8		0,257	16,2			8,0			
	10,2		0,252	17,9			7,0			
	9,8		0,249	18,9			5,4			
	9,5		0,246	19,8			4,5			
	8,4		0,237	22,7			3,0			
	8,0		0,234	23,8			2,0			
	7,2		0,228	25,8			1,5			
	6,8		0,225	26,8			1,0			
	5,8		0,217	29,3			0			
	5,5		0,215	30,0			-0,5			
	4,0		0,204	33,5			-1,0			

Наявність експериментальних даних дозволила вирішити низку наукових задач. Для підтвердження адекватності математичної моделі тепломасообміну в ежекційному апараті і формули Стефана для розрахунку густини потоку речовини в сферичній системі координат виконано порівняння експериментальних даних з даними чисельних розрахунків при варіації товщини дифузійного пограничного шару  $\delta_d$ , в долях від радіусу краплі (рис. 13).

Найкраща сходиність спостерігається при товщині  $\delta_d$ , що дорівнює 0,6 від радіусу краплі.



**Рисунок 13** – Порівняння експериментальних і теоретичних даних по тепломасообміну в ежекційному апараті

Для інженерного розрахунку контактних конденсаторів парів нафтопродуктів нами запропоновано використовувати методику Андреева Є.І. Ним встановлено, що розрахунок параметрів рідини і ППС в широкому діапазоні їх зміни в контактних апаратах може вестися з використанням критеріального рівняння інтенсивності тепломасообміну виду  $Km = A \cdot Re_K^{x_2} \cdot Vm_1^{x_3}$ , де  $Re_K$  – число Рейнольдса краплі;  $Vm_1$  – число подібності теплових еквівалентів;  $A$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  – коефіцієнт та показники ступеня.

В результаті обробки отриманих експериментальних даних, з використанням методу найменших квадратів, нами був знайдений остаточний вигляд рівняння інтенсивності тепломасообміну для процесу обробки ППС водним розчином  $CaCl_2$ :

$$Km = 26,4 \cdot Re^{-0,541} \cdot Vm_1^{-0,369} \quad (14)$$

Формула (14) апроксимує експериментальні дані із середньою похибкою 10,8%.

У п'ятому розділі виконаний розрахунок економічних показників впровадження конденсаційної системи УЛФ з використанням ежекційного пристрою.

Для того, щоб впровадження системи УЛФ було економічно виправданим, величина доходу від вловлювання нафтопродуктів має перевищувати величину витрат на експлуатацію системи. Конденсаційна система УЛФ може використовуватися на будь-яких об'єктах зберігання нафтопродуктів. Для прикладу виконані розрахунки економічних показників при впровадженні системи на АЗС. При зливанні  $10 \text{ м}^3$  бензину з автомобільної цистерни в підземний резервуар РГС 25 виникне потік ППС через дихальний трубопровід, середня величина якого, згідно з математичною моделлю (розділ 2), становить  $36 \text{ м}^3/\text{год}$ . Якщо вважати, що пари бензину в резервуарі знаходяться в насиченому стані, об'ємна концентрація парів при їх температурі  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  на вході в ежекційний апарат складе  $0,244 \text{ м}^3(\text{парів})/\text{м}^3(\text{ППС})$ . ППС охолоджується в ежекційному конденсаторі на краплях розсолу, які мають температуру  $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ви-

трата розсолу  $0,7 \text{ м}^3/\text{год}$ . Згідно з розрахунками за математичною моделлю теплома-сообміну (розділ 3) маємо на виході розсіл і ППС з температурами  $-21 \text{ }^\circ\text{C}$ . Концентрація парів на виході  $0,063 \text{ м}^3(\text{парів})/\text{м}^3(\text{ППС})$ . При ефективності вловлювання  $\chi = 74,2 \%$  (об.) в ємності 8 (рис. 1) накопиться 7,8 л конденсату за одне велике дихання. При ціні 23 гривні за літр бензину дохід від системи конденсаційної УЛФ складе 180 грн за одне велике дихання.

Для того, щоб охолодити на  $4 \text{ }^\circ\text{C}$   $0,7 \text{ м}^3/\text{год}$  розсолу холодопродуктивність холодильної машини має становити не менше 2300 Вт. Необхідну холодопродуктивність забезпечує компресорно-конденсаторний агрегат (ККА) OP-LCHC068NTA02E фірми Danfoss із холодоагентом R452A. При температурі кипіння холодоагенту в випарнику  $-28 \text{ }^\circ\text{C}$  і температурі оточуючого середовища  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  споживна потужність ККА при заданому режимі роботи складе 1680 Вт.

В якості розсолу прийнятий  $25,7 \%$  (мас.) водний розчин  $\text{CaCl}_2$ . При температурі  $-25 \text{ }^\circ\text{C}$  він має густину  $1240 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Температура замерзання складає  $-31,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Підібраний розсільний відцентровий насос СМЕ1-7 фірми Grundfos з наступними характеристиками: повний напір  $0,3 \text{ МПа}$ , витрата  $0,7 \text{ м}^3/\text{год}$ , споживна потужність 191 Вт.

Витрати на енергоспоживання ККА та розсільним насосом за одне велике дихання при вартості електроенергії  $1,5 \text{ грн}/\text{кВт}\cdot\text{год}$  складуть відповідно 74 і 8 коп. Таким чином розрахунок затрат на експлуатацію конденсаційної системи УЛФ з використанням ежекційного пристрою показав доцільність її впровадження, оскільки для уловлювання одного літра бензину потрібно затратити лише 11 копійок ( $(74 \text{ коп} + 8 \text{ коп})/7,84 \text{ л} = 11 \text{ коп}/\text{л}$ ), що значно менше відпускної ціни бензину на АЗС.

Аналогічні розрахунки для умов АЗС в м. Рені, що обслуговує 500 авто за добу, показали, що при річних втратах бензину 1282 кг термін окупності складе 5 років.

## ВИСНОВКИ

В дисертації наведений новий підхід до вирішення науково-практичної проблеми, пов'язаної з уловлюванням легких фракцій нафтопродуктів, який полягає у впровадженні системи конденсаційної УЛФ з використанням ежекційного пристрою. Отримані в роботі наукові результати та математичні моделі рекомендовано використовувати при проектуванні промислових систем УЛФ з ежекційним пристроєм.

1. В ході теоретичних досліджень гідродинаміки газорідного факелу встановлено, що напрямок факелу істотно впливає на швидкість крапель, форму і площу перерізу факелу, тому при моделюванні процесів гідродинаміки напрямок факелу має бути врахований.

2. Математичне моделювання гідродинаміки в ежекційному апараті дозволило встановити, що величина його повного напору складає десятки і сотні паскаль, що в силу своєї малої величини не може вплинути на час зливання нафтопродукту і інте-

нсивність його випаровування при великому диханні резервуару.

3. Чисельний експеримент спрямований на дослідження впливу вихідних умов на основні показники роботи апарату показав наступне: значною мірою на ефективність вловлювання та локальні характеристики теплообміну впливають витрати пароповітряної суміші і рідини; незначний внесок (до 3,5%) в ефективність вловлювання роблять стінки апарату і краплевловлювач; деякою мірою температура охолодження ППС залежить від товщини дифузійного пограничного шару, зокрема встановлено, що при зменшенні товщини прикордонного шару в п'ять разів розрахункова температура охолодженої ППС істотно знижується (на  $3\text{ }^{\circ}\text{C} \div 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) у порівнянні з товщиною, що дорівнює радіусу краплі; для умов дихань резервуарів АЗС загальну довжину ежекційного апарату, виходячи з міркувань зниження металоємності, доцільно робити не більше 1,5м.

4. Для інженерного теплового розрахунку ежекційного апарату може бути використане рівняння інтенсивності тепломасообміну, яке отримане автором при узагальненні власних експериментальних даних.

5. Розрахунки, що виконані на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень, показали, що використання конденсаційної системи УЛФ з ежекційним пристроєм на об'єктах нафтопродуктозабезпечення є доцільним з точки зору покращення економічних показників їх роботи.

## **ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Статті, в яких опублікуванні основні результати дисертації**

1. Бузовский В.П., Кологривов М.М. Результаты математического моделирования гидродинамической картины в эжекционном аппарате / Холодильная техника и технология. 2013. №6 (146). с. 29-37.

2. Бузовский В. П., Кологривов М.М. Результаты теоретического исследования влияния тепломассообмена на гидродинамическую картину в эжекционном аппарате / Харчова наука і технологія. 2013. № 4. С. 137-143.

3. Кологривов М.М., Бузовский В.П. Эффективность работы промышленных контактных аппаратов / Холодильная техника и технология. 2014. №2 (148). с. 60 - 63.

4. Кологривов М.М., Бузовский В.П. Инженерная методика расчета тепломассообмена в эжекционном аппарате / Наукові праці: ОНАХТ. 2014. Вип. (45), том 1. с. 38-45.

5. Кологривов М. М. Бузовский В. П. Проектирование эжекционного конденсатора бензиновых паров из парогазовых смесей / Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. № 4(6). С. 29-37.

6. Kologrivov M. M., Buzovskii V. P. Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in an Ejection Apparatus / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2016. V. 89. №. 1. с. 167-178. (Фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази Scopus).

## Патенти

7. Пат. 98849 Україна, МПК (2015.01) B01D 5/00. Конденсаційний спосіб уловлювання парів нафтопродуктів з парогазових потоків, що відходять [Текст] / Кологривов М. М., Бузовський В. П. – № у 2014 12463; заявл. 20.11.2014; опубл. 12.05.2015, Бюл. № 9. – 5 с.

8. Пат. 98848 Україна, МПК (2015.01) B01D 5/00. Конденсаційна система уловлювання парів нафтопродуктів з парогазових потоків, що відходять [Текст] / Кологривов М. М., Бузовський В. П. – № у 2014 12462; заявл. 20.11.2014; опубл. 12.05.2015, Бюл. № 9. – 6 с.

## АНОТАЦІЯ

**Бузовський В.П. Розробка ефективного конденсаційного методу вловлювання парів легких фракцій нафтопродуктів з використанням ежекційного пристрою:** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. – Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2018.

Розроблено схемне рішення пожежо- вибухобезпечного та ефективного конденсаційного методу вловлювання парів легких фракцій нафтопродуктів з використанням ежекційного пристрою.

Розглянена математична модель гідродинаміки обмеженого горизонтального факела, яка дозволила отримати локальні характеристики рухомих середовищ, напірну характеристику ежекційного апарату і дослідити його вплив на час зливання нафтопродукту і інтенсивність його випаровування.

Виконане дослідження тепломасообміну в ежекційному апараті дозволило оцінити вплив витрати ППС, розсолу, стінок апарату та товщини дифузійного пограничного шару на ефективність вловлювання. Адекватність прийнятої математичної моделі тепломасообміну перевірена шляхом порівняння з експериментальними даними.

Отримані експериментальні дані теплообміну в ежекційному апараті використані в подальшому при розробці інженерної методики.

Адекватність прийнятої моделі перевірена шляхом порівняння з отриманими даними експериментальних досліджень.

В ході техніко-економічного аналізу доведена доцільність впровадження системи УЛФ з ежекційним пристроєм на об'єкті нафтопродуктозабезпечення.

**Ключові слова:** уловлювання парів нафтопродуктів, гідродинаміка, тепломасообмін, математичне моделювання, ежекційний апарат, газорідинний факел, дифузія, великі та малі дихання.

## АННОТАЦИЯ

**Бузовский В.П. Разработка эффективного конденсационного метода улавливания паров легких фракций нефтепродуктов с использованием эжекционного устройства:** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – Трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища. – Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 2018.

Разработано схемное решение пожаро- взрывобезопасного и эффективного конденсационного метода улавливания паров легких фракций нефтепродуктов с использованием эжекционного устройства.

Рассмотрена математическая модель гидродинамики ограниченного горизонтального факела, которая позволила получить локальные характеристики движущихся сред, напорную характеристику эжекционного аппарата и исследовать его влияние на время слива нефтепродукта и интенсивность его испарения.

Проведенное исследование тепломассообмена в эжекционном аппарате позволило оценить влияние расходов ППС и рассола, стенок аппарата и толщины диффузионного пограничного слоя на эффективность улавливания. Адекватность принятой математической модели тепломассообмена проверена путем сравнения с экспериментальными данными.

Полученные экспериментальные данные теплообмена в эжекционном аппарате использованы в дальнейшем при разработке инженерной методики.

Адекватность принятой модели проверена путем сравнения с полученными данными экспериментальных исследований.

В ходе технико-экономического анализа доказана целесообразность внедрения системы УЛФ с эжекционным устройством на объекте нефтепродуктообеспечения.

**Ключевые слова:** улавливание паров нефтепродуктов, гидродинамика, тепломассообмен, математическое моделирование, эжекционный аппарат, газожидкостный факел, диффузия, большие и малые дыхания.

## ABSTRACT

**Buzovskii V.P. Developing an effective condensing method of petroleum products light fraction vapor recovery using an ejection device.** – Manuscript.

The dissertation is submitted for the candidate's degree of the technical sciences (PhD), specialty 05.15.13 – Pipeline transport, oil and gas storages. – Odessa National Academy of Food Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Odessa, 2018.

Developed schematic decision for condensing method of petroleum products light fraction vapor recovery using an ejection device. This method appears to be safe in terms of fire-risk and explosiveness, and requires comparatively little investments. In the section dedicated to patent search, examined the construction of ejection type oil vapor condenser.

Shown the advantages of ejection apparatus, the main ones are the impossibility of static electricity in the flow of moving media, the possibility of adjusting the heat exchange surfaces in a wide range, low material consumption.

Based on the ideas of the interpenetrating and multispeed continuum medium, a mathematical model of limited horizontal torch hydrodynamics was composed. Were obtained local hydrodynamic characteristics of moving media. The numerical solution of differential equations of fluid dynamics model allowed us to obtain the pressure characteristic of the ejection apparatus and an ejection coefficient. On the principle of ascent from simple to complex, study of hydrodynamics of ejection apparatus is divided on three steps. On the first step the moving of a liquid drop in a resisting medium is investigated. A numerical solution of differential equations of motion let us establish a character of hydraulics parameters changing. It is shown that at speed above then 19 m/s and at the length of horizontally directed spray less then 1 m the shape of spray may be considered as a cone, which is formed by the rotation of the last side trickle around the axis which coincides with the direction of horizon. Also established that in all cases volume concentration of gas may be neglected.

For the solving the problem of the air vapor mixture parameters calculating at the tank working breathing the comprehensive approach is applied. Suggested the common solving of the hydraulic equations, which characterize the process of gasoline level alignment in gasoline tank truck and the underground tank, the gas dynamics equations, which characterize the process of air vapor mixture removal from the tank and the equations that characterize the process of gasoline evaporation. This method let us to receive the parameters of removing air vapor mixture, which are necessary for the ejection apparatus heat and mass transfer calculations.

The method of heat calculation of the original ejection apparatus for cooling and condensation of the components from air vapor mixture is suggested. Applied to the process of gasoline storage we developed the mathematical model of heat and mass transfer in such apparatus at condensation of gasoline and water vapors from removed flow. At accepted assumptions for multi component mixture were received formula which is similar to Stephan's formula for vapor condensation on drops. Although Stephan's formula largely idealizes the real picture, it became the basic for mathematical modeling and analyzes of calculated data.

The basic results of the calculations by the model are presented graphically. The results of the modeling let us choice correctly the working regime of the apparatus according to cooling machine passport characteristics, which is a part of a vapor recovery unit. Water vapor condensation practically don't influence the effect of air vapor mixture cooling. An evaluation of walls contribution at common effect from heat and mass transfer is performed. Were shown that the condensation on the walls is not more 3,5% from common volume of gasoline at its condensation. The results of modeling let us make a quantitative assessment of accepted boundary diffusion layer thickness influence on the air vapor mixture cooling effect. The adequacy of the adopted model is verified by comparison with the obtained experimental data.

The practical recommendations for choosing vapor recovery unit equipment

with the ejection apparatus are given.

In the conditions of filling station working in Reni with gasoline and diesel annual turnover 2465 t/yr and 1571 t/yr respectively standard value of annual losses is 1282 kg/yr and 31 kg/yr gasoline and diesel respectively. Taking in account received results the practical recommendations on capability of diesel neglecting at performing estimated calculation of standard oil products losses quantity are given.

For payback period calculation the method which takes into account a time factor and a money depreciation is recommended. Established that at the conditions of filling station at capital investments in vapor recovery unit at 110440 grn, annual income from gasoline catching at the level 40118 grn and discount 10% payback period will be 5 years.

**Key words:** vapor recovery of petroleum products, fluid dynamics, heat and mass transfer, mathematical modeling, ejection apparatus, gas-liquid torch, diffusion, working and standing losses.