

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

РИБАЧОВ СЕРГІЙ ГРИГОРОВИЧ



УДК 697.921

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ПОВІТРЯНО-СТРУМИННЕ ЕКРАНУВАННЯ
КРУПНОГАБАРИТНИХ ПРОМИСЛОВИХ ВАНН**

05.23.03 – Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теплогазопостачання та вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
КОРБУТ ВАДИМ ПАВЛОВИЧ
професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції
Київського національного університету будівництва і
архітектури

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ЖЕЛИХ ВАСИЛЬ МИХАЙЛОВИЧ
завідувач кафедри теплогазопостачання і вентиляції
Національного університету «Львівська політехніка»

кандидат технічних наук, професор
РАТУШНЯК ГЕОРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ,
професор кафедри інженерних систем у будівництві
Вінницького національного технічного університету

Захист відбудеться “_____” _____ 2021р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.07 при Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31, ауд. 466.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31.

Автореферат розісланий “_____” _____ 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
Вченої ради Д 26.056.07
доктор технічних наук, професор

Ткаченко Т.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Використання систем місцевої витяжної вентиляції продовжує залишатися найбільш надійним способом уловлювання забруднюючих речовин в технологічних процесах різних галузей промисловості України. Головною метою застосування систем місцевої витяжної вентиляції є ефективно уловлювання забруднюючих речовин в місцях їх утворення. Ефективність роботи місцевих відсмоктувачів та зменшення навантаження загальнообмінної вентиляції можна досягти за рахунок використання повітряних екранів. Найчастіше застосовують активовані бортові відсмоктувачі які працюють по схемі «струмина-відсмоктувач», що конструктивно розташовані на одній осі припливного насадку і щілинного стоку. За таким принципом роботи різноманітні активовані відсмоктувачі потребують повітрообмін у великих об'ємах із значними витратами енергоресурсів і при цьому з недостатньо високими санітарно-гігієнічними показниками. З метою збільшення ефективності роботи системи місцевої вентиляції, особливо для ємностей зі значними відкритими поверхнями, потрібні принципово нові аеродинамічні схеми, особливість яких полягає у формуванні динамічних екранів з припливно-обертовими потоками.

Течії, які формуються поблизу всмоктуючих щілинних отворів відносяться до типу потенційних течій ідеальної рідини. Ідеальність порушується поблизу твердих поверхонь, де формується пограничний шар, в якому з'являються сили густини. В місцях з кривизною ліній стоку утворюються вихрові циркуляційні зони, ліквідація яких допомагає позбутися виносу забруднюючих речовин в середовище приміщення. Визначені границі відривних зон необхідно враховувати при конструюванні бортових відсмоктувачів.

Найбільш розповсюдженими конструкціями малогабаритних ванн для вловлювання газових і теплових потоків є місцеві відсмоктувачі відкритого типу, переважно у вигляді панелей бортових, кільцевих та однобортівими повітряно-струминними огороженнями. Серед варіантів активованих відсмоктувачів найчастіше зустрічаються схеми з розташуванням на одній осі припливного насадка і щілинного стоку над дзеркалом рідини.

Промислові ванни, що використовуються для обробки великогабаритних виробів з розмірами більше 3 м, традиційні способи і конструктивні рішення для видалення шкідливостей є недостатньо ефективними. Напрямок, в якому використовується засіб зростання швидкості припливної активуючої струмини викликає утворення хвиль на її відкритій поверхні, збільшуючи тепломасообмін і перенесення шкідливостей в середовище приміщення, тому тема є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана згідно з Державною програмою “Створення систем і обладнання екологічно безпечних енерготехнологічних комплексів України” і тісно пов'язана з планами держбюджетної тематики Київського національного університету будівництва і архітектури на замовлення Міністерства освіти і науки України (№ державної реєстрації 0116U000843).

Мета дослідження полягає в науковому обґрунтуванні удосконалення і розвитку теорії взаємодії плоского припливно-струминних та обертових повітряних

потоків з метою підвищення ефективності локалізації шкідливих виділень від промислових ванн із застосуванням нових рішень динамічних повітряно-струминних огорожень.

Завдання дослідження:

- проаналізувати існуючі системи повітряно-струминних течій бортових відсмоктувачів, їх конструктивні рішення та методи досліджень турбулентного переносу імпульсу, енергії і речовин активованих відсмоктувачів;
- розробити напрямок збільшення ефективності роботи системи місцевої вентиляції для промислових ємностей зі значними поверхнями випаровування;
- узагальнити і поглибити теорію аеродинамічних і теплообмінних процесів на фізико-математичній моделі з дворівневим повітряно-струминним екрануванням;
- виконати експериментальні дослідження на моделі промислової ванни з повітряно-струминним екрануванням для визначення закономірностей найбільш ефективного вловлювання шкідливостей дворівневою припливно-витяжною системою;
- розробити нову енергоефективну конструкцію для локалізації шкідливих речовин від промислових ванн різного призначення;
- розробити інженерну методику розрахунку дворівневої повітряно-струминної течії для відкритої поверхні промислових ємностей.

Об'єкт дослідження – місцева система вентиляції з дворівневим повітряно-струменевим екраном промислової ванни.

Предмет дослідження – процеси руху повітряно-струминних потоків для локалізації шкідливих речовин від відкритих поверхонь промислових ванн.

Методи дослідження. У роботі використано фізико-математичні методи досліджень; методи математичної статистики та обчислювальної математики; методи математичного моделювання та комп'ютерного дослідження; експериментальні дослідження в лабораторних умовах локалізації шкідливих парів від промислових ванн.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше:

- обґрунтовано ефективність динамічного взаємозв'язку припливно-струминної течії з обертовим потоком, фізичні особливості якого визначають розвиток теоретичних і експериментальних досліджень в напрямку, що забезпечать максимально-можливе вловлювання шкідливих речовин при мінімальній витраті енергоємності;
- отримано характеристики дворівневого повітряно-струминного екрану, що підтверджують адекватність розробленої фізико-математичної моделі;
- уточнено математичні та геометричні характеристики дворівневої моделі повітряно-струминного екранування зі співвідношеннями припливного повітря та обертового потоку, що відсмоктується, для найбільш ефективного вловлювання шкідливостей.

Набуло подальшого розвитку:

- наукове обґрунтування та поглиблення методики фізико-математичного моделювання повітряного екрану, в якій розглядаються співвісні зустрічні струмини з ежекційним підживленням у сполученні з обертовими потоками.

Практичне значення одержаних результатів

Розроблено та захищено патентом України пристрій для видалення шкідливих виділень.

Створено інженерну методику розрахунку та прийняття конструктивних рішень елементів дворівневого повітряно-струминного екрану з використанням аеродинамічних властивостей повітряних плоских припливно-струминних та взаємодіючих з ними обертових потоків.

Розроблено рекомендації щодо удосконалення конструкції і експлуатації дворівневого повітряно-струминного екрану для підвищення його енергетичної ефективності та ефективнішої локалізації та вловлювання шкідливих речовин.

Особистий внесок здобувача.

Наукові результати, що викладені в даній дисертаційній роботі, отримані особисто здобувачем на підставі виконаного аналізу відомих методів і математичних моделей досліджень турбулентного переносу імпульсу, енергії і речовин активованих відсмоктувачів. Розроблені математичні моделі повітряного екрану, в яких розглядаються співвісні зустрічні струмини; запропоновано використання плоских струмин з ежекційним підживленням у сполученні з обертовими потоками; досліджено взаємодія повітряних потоків над рідинною поверхнею промислових ванн. Виконані експериментальні дослідження для уточнення співвідношення припливного повітря та обертового потоку, що відсмоктується, для найбільш ефективного вловлювання шкідливостей; розроблена інженерна методика розрахунку систем місцевої вентиляції.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень та окремі розділи дисертації доповідались на науково-практичних конференціях Київського національного університету будівництва і архітектури (м. Київ, 2017-2018 рр.); “Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві “Енергоінтеграція” (м. Київ, 2019); на Першій міжнародній науково-практичній конференції “Просторовий розвиток територій: традиції та інновації” (м. Київ, 2019 р.); на міжнародних конференціях: «Build Master Class 2016» (м. Київ, 2016 р); «Build Master Class 2017» (м. Київ, 2017 р).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 6 друкованих наукових праць. З них п'ять у наукових фахових виданнях України, одна стаття у міжнародному виданні, одержано 1 патент України на корисну модель.

Структура роботи.

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 150 найменувань і додатка. Робота викладена на 175 сторінках, містить 49 рисунків, 14 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** наводиться обґрунтування актуальності даної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, викладена їхня наукова новизна та практична цінність.

У **першому розділі** наведено аналіз сучасного рівня вирішення задачі локалізації та вловлювання технологічних шкідливостей за допомогою місцевої вентиляції в промислових приміщеннях. Відмічено недостатнє вивчення і застосування бортових відсмоктувачів від промислових ванн для обробки

великогабаритних виробів, що мають ширину більше 3 м. Значна площа дзеркала рідини, високі температури розчинів, технологічні обмеження розмірів бортів ванн сприяють виникненню і рециркуляції конвективних забруднених потоків над поверхнями ванн з подальшим потраплянням в об'єм приміщення, що підтверджено натурними дослідженнями. Підтримання належного нормованого стану повітряного середовища будівель з ваннами великих габаритів вимагає організації повітрообміну в великих об'ємах повітря. Різноманітні активовані відсмоктувачі в промислових цехах розглянуті в працях В.В. Батуріна, В.А., Бутакова, В.П. Корбута, І.А. Шепелева, В.Н. Посохіна, М.Й. Гримітліна, О.М. Голишева, А.Ф. Строй та ін. Показано необхідність дослідження турбулентного переносу імпульсу, енергії і речовин активованих відсмоктувачів, а також визначення закономірностей для найбільш ефективного вловлювання шкідливостей при необхідних конструктивних параметрах.

Проведено аналіз теорій взаємодій припливних струмин, всмоктуючих факелів та конвективних потоків від рідинних поверхонь. При розробці теорій застосовувались дослідні дані які обґрунтовують необхідність експериментального дослідження взаємодій струмин. Розглянуто відомі конструкції активованих бортових відсмоктувачів. Показано відсутність енергоефективних систем дворівневих повітряно-струменевих екранів для крупногабаритних промислових ванн. Обґрунтовано застосування динамічного повітряно-струминного принципу екранування промислових ванн для відокремлення джерела шкідливих виділень від повітряного середовища приміщення.

На підставі критичного аналізу вищерозглянутих питань з точки зору їхньої дослідженості виконані висновки та сформована мета і задачі досліджень за темою дисертації.

У другому розділі виконані аналітичні дослідження питань, пов'язаних з розробкою енергоефективних конструкцій дворівневих повітряно-струменевих екранів для крупногабаритних промислових ванн.

Виконані теоретичні дослідження локалізації дифузійних шкідливих речовин шляхом розробки математичної моделі дворівневого повітряно-струминного екрану, що за технічними рішеннями принципово відрізняється від існуючих струминних огорожень. Наведені основні результати чисельного моделювання процесів аеродинаміки, міжфазного тепломасопереносу та їх особливості для різних режимів струминних течій.

Розглядається аеродинамічна задача плоскої турбулентної течії, в якій взаємодіють припливні струмини з розгортанням на 180° , утворюючи дворівневу замкнуту обертову систему із зосередженим стоком, на яку впливають конвективні потоки зі шкідливими речовинами від промислової ванни.

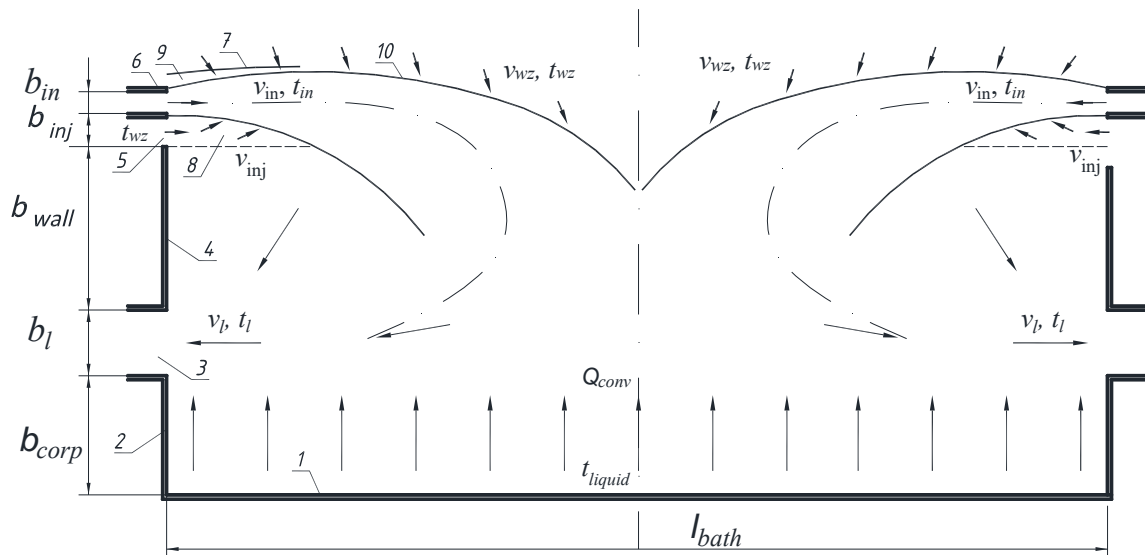


Рис. 1. Схема дворівневого повітряно-струминного екрану з ежекційним підживленням:

1 – поверхня рідини; 2 – корпус ванни; 3 – щілина всмоктування; 4 – непроникна стінка; 5 – щілина ежекції; 6 – припливна щілина; 7 – вільна межа струмини повітря, що присмоктується; 8 – ежекуючий примежовий шар; 9 – вторинна струмина; 10 – струминний примежовий шар

Числове моделювання виконувалось на основі системи рівнянь нерозривності, турбулентного переносу імпульсу та енергії (система рівнянь Рейнольдса), що доповнюється k - ϵ моделлю турбулентності. Розв'язання цієї системи рівнянь здійснювалось методом скінчених різниць шляхом дискретизації в контрольному об'ємі системи диференціальних рівнянь в частинних похідних.

Динаміка турбулентної повітряної течії та перенесення теплоти і маси для нестисливого середовища описується системою рівнянь, яка для постановки задачі має вигляд:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + v_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + g\beta(T - T_0); \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + v_t) \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(a + \frac{v_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(a + \frac{v_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial t}{\partial y} \right]; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial \tau} + u \frac{\partial \rho_v}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(D + \frac{v_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(D + \frac{v_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial \rho_v}{\partial y} \right]; \quad (5)$$

де τ, c - час; x, m - вертикальна координата; y, m - горизонтальна координата; $u, m/c$ - вертикальна швидкість; $v, m/c$ - горизонтальна швидкість; p, Pa - надлишковий тиск; $t, ^\circ C$ - температура; $\rho, kg/m^3$ - густина повітря; $\rho_v, kg/m^3$ - парціальна густина (концентрація) водяної пари в повітрі; $g=9,81 m/c^2$ - прискорення сили тяжіння; $\nu, m^2/c$ - кінематичний коефіцієнт в'язкості; $\nu_t, m^2/c$ - коефіцієнт турбулентної в'язкості; $a, m^2/c$ - коефіцієнт температуропровідності; $D, m^2/c$ - коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі; σ_t - турбулентне число Прандтля; σ_c - турбулентне число Шмідта.

Наведена система рівнянь турбулентного перенесення замикається рівняннями $k - \varepsilon$ моделі турбулентності:

$$\frac{\partial k}{\partial \tau} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \nu_t S^2 - \varepsilon; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_t S^2 - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (7)$$

де k – кінетична енергія турбулентності; ε – швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності;

S – швидкість деформації потоку, що розраховується як

$$S = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{0,5}$$

Згідно з $k - \varepsilon$ моделлю коефіцієнт турбулентної в'язкості ν_t розраховується за виразом

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (8)$$

Для даної системи рівнянь формуються наступні граничні умови:

$$y=0: p=0; u=0; \frac{\partial k}{\partial y} = 0; \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0; \frac{\partial t}{\partial y} = 0; \frac{\partial \rho_w}{\partial y} = 0;$$

$$y=l: p=0; u=0; \frac{\partial k}{\partial y} = 0; \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0; \frac{\partial t}{\partial y} = 0; \frac{\partial \rho_w}{\partial y} = 0;$$

$$x=0 \text{ (поверхня рідини в ванні): } v=0; u=0; k=0; \varepsilon=0; t = t_{liq}; \rho_w = \frac{p_{sut}(t_{liq})}{R_{vap}(t_{liq} + 273)}$$

$x=H$ (верхня межа розрахункової області):

$$p=0; v=0; \frac{\partial k}{\partial x} = 0; \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0; \frac{\partial t}{\partial x} = 0; \frac{\partial \rho_w}{\partial x} = 0;$$

де $t = t_{liq}, ^\circ C$ - задана температура поверхні ванни; $p_{sut}(t_{liq}), Pa$ - тиск насиченої водяної пари при температурі t_{liq} ; R_{vap} - газова стала для водяної пари. Заданими також

вважаються швидкість і температура повітряної течії в щілинах нагнітання. Вважається також відомою швидкість повітря в щілині видалення повітря.

На ділянках розрахункової області, що відповідають припливним щілинам задаються значення швидкості припливної течії повітря v_{in} та температури припливної течії t_{in} . На ділянках, що відповідають щілинам всмоктування задаються значення швидкості всмоктування повітря v_l

За розробленою методикою виконувалось числове моделювання руху повітря над нагрітою поверхнею ванни, полів швидкостей і температур повітряних потоків при роботі дворівневого повітряно-струминного екрану. Результати моделювання над нагрітою горизонтальною поверхнею, які отримані числовим методом, показані на рис. 2-5.

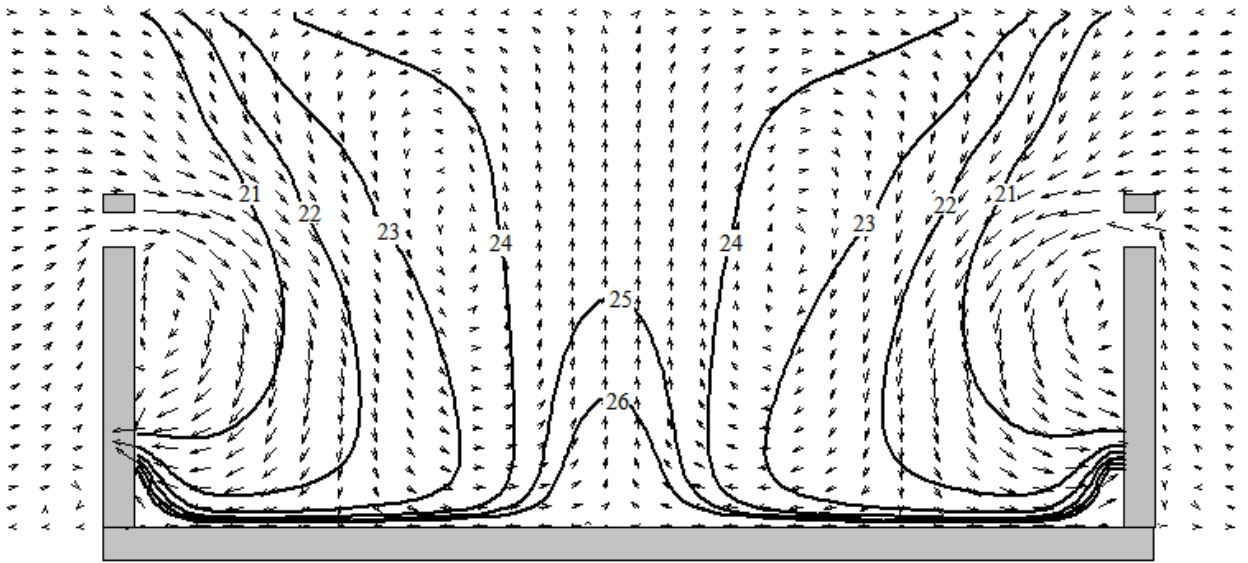


Рис. 2 Розподіл температури ($^{\circ}\text{C}$) і швидкості течії повітря над поверхнею ванни за умови $b_{wall}/l=0,27$; $v_{in}/v_l = 2,25$.

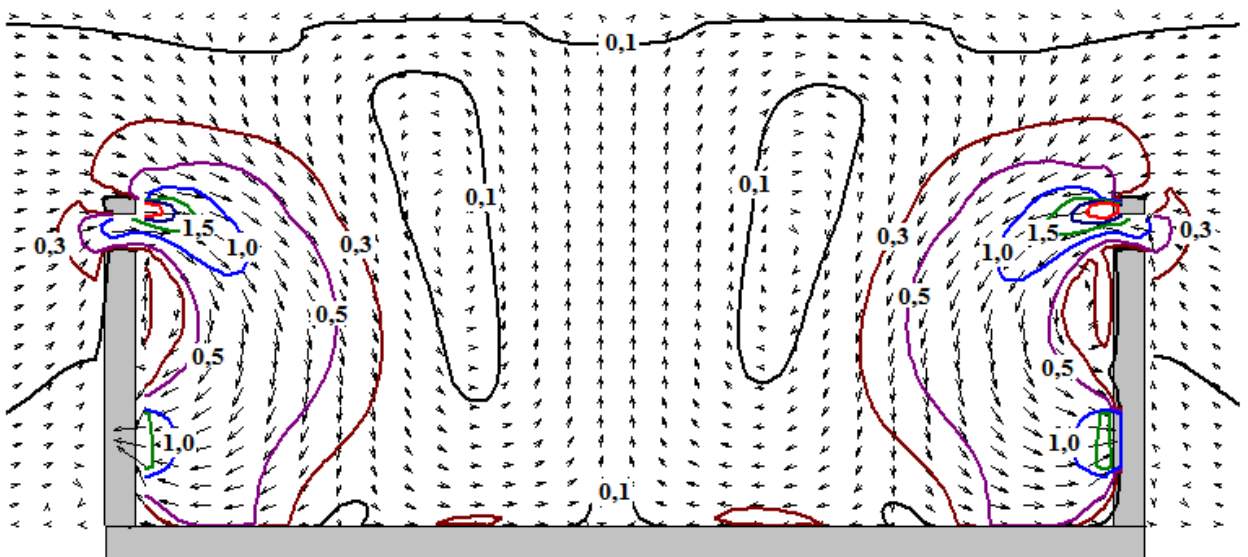


Рис. 3 Ізолінії швидкості течії повітря над поверхнею ванни за умови $b_{wall}/l=0,27$; $v_{in}/v_l = 2,25$.

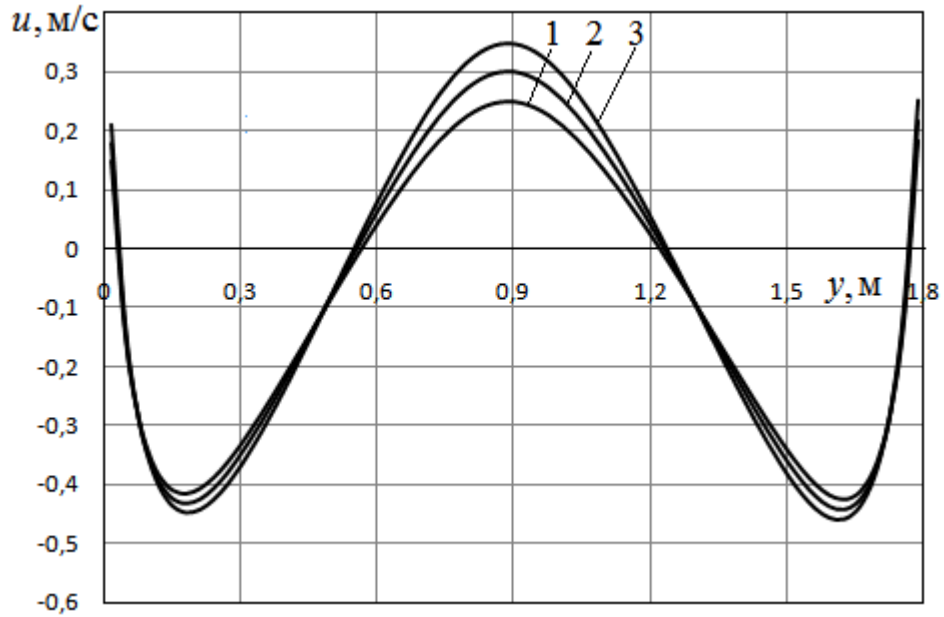


Рис.4 Розподіл вертикальної швидкості u вздовж горизонтального перерізу над припливною щілиною при $b_{wall}/l=0,27$: 1 - $v_{in}/v_l = 2,25$; 2 - $v_{in}/v_l = 2,5$; 3 - $v_{in}/v_l = 2,75$

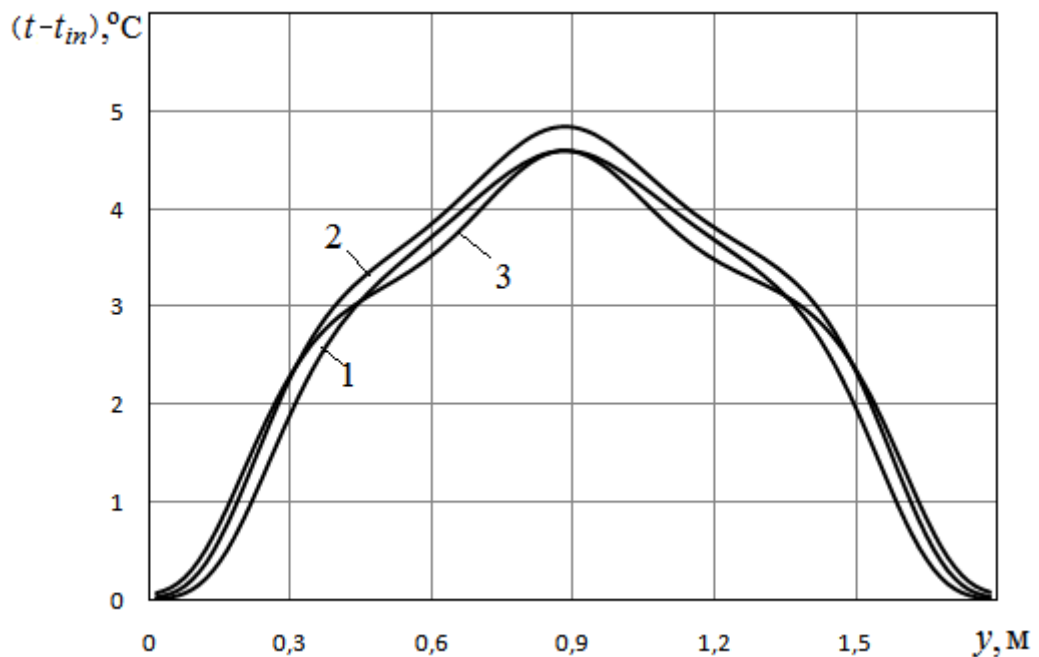


Рис.5. Розподіл надлишкової температури $(t - t_{in})$ вздовж горизонтального перерізу над припливною щілиною при $b_{wall}/l=0,27$: 1 - $v_{in}/v_l = 2,25$; 2 - $v_{in}/v_l = 2,5$; 3 - $v_{in}/v_l = 2,75$.

З наведених на рис. 2 - 5 результатів видно, що зі збільшенням параметра висоти борта ванни зменшуються як вертикальна швидкість, так і надлишкова температура над припливною щілиною. Це вказує на зменшення обсягу теплоти (а також маси шкідливих домішок), що переноситься вгору за межі дворівневого повітряно-струминного екрану через площину над припливною щілиною.

У третьому розділі представлені планування експерименту, установка і методика проведення досліджень, обробка експериментальних даних. Досліди виконані на стенді (Рис 6), обладнаному засобами визначення і фіксації результатів вимірювання та захищеному від зміни напруги і сторонніх теплових потоків.

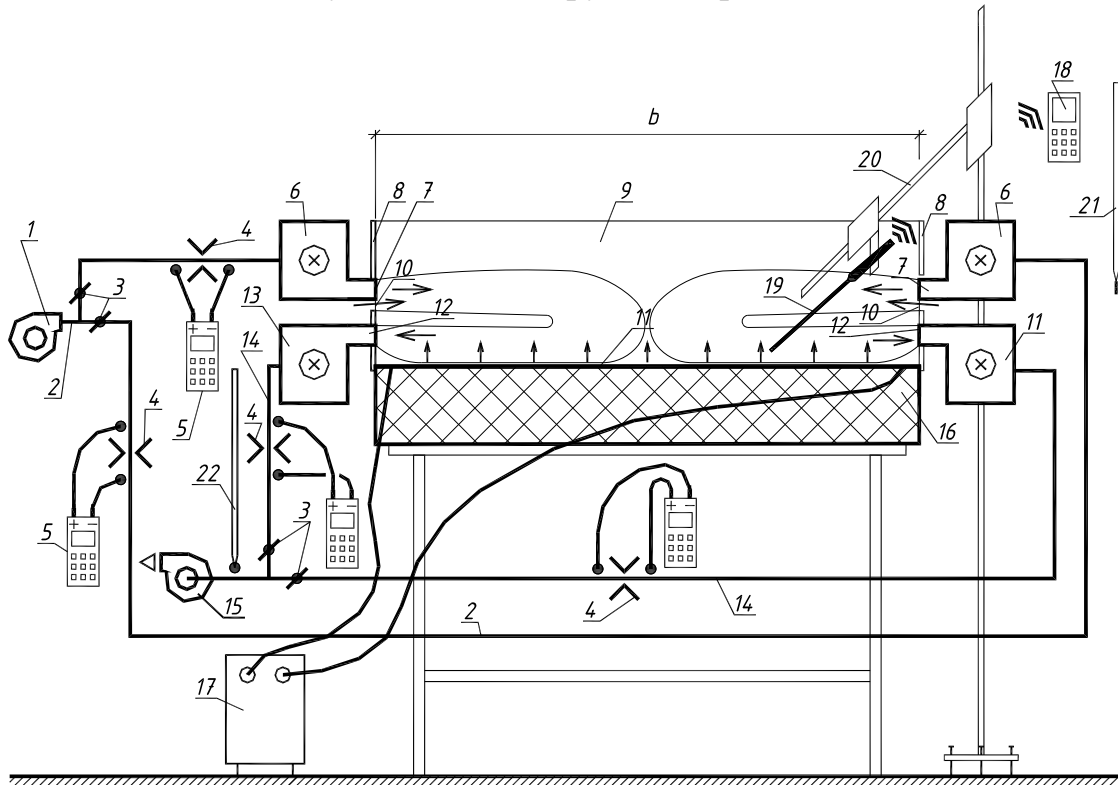


Рис. 6. Дослідний стенд:

1 - припливний вентилятор; 2 - припливні повітроводи; 3 - дросель-клапан; 4 - витратомірна діафрагма; 5 - мікроманометр; 6 - щілинний повітророзподільник; 7 - припливна щілина; 8 - повітронепроникна стінка; 9 - модель ванни; 10 - ежекційна щілина; 11 - джерело шкідливих виділень (повітронагрівач); 12 - відсмоктувальна щілина; 13 - щілинний відсмоктувач; 14 - щілинні повітроводи; 15 - витяжний вентилятор; 16 - теплоізоляція; 17 - лабораторний автотрансформатор; 18 - термоелектроанемометр Testo-440; 19 - датчик "Нагріта куля"; 20 - координатник; 21 - комп'ютер; 22 - термометр для вимірювання температури повітря робочої зони; 23 - термометр у повітроводі витяжного повітря

Визначення оптимальних геометричних розмірів між припливними отворами і стоком, висоти ежекційної щілини та непроникної стінки, співвідношення швидкостей припливу та відсмоктування виконано шляхом математичного (k -е модель турбулентного руху) та фізичного моделювання.

Для проведення експериментальних досліджень було виконано квадратичне планування чотири факторного експерименту на підставі ортогонального центрального композиційного плану. В якості вхідних факторів було прийнято такі величини:

$$x_1 = L_{in}/L_l - \text{відношення витрат припливного та відсмоктуючого повітря};$$

$$x_2 = b_{wal}/l - \text{відношення висоти стінки борта до ширини ванни};$$

$x_3 = b_{inj}/l$ - відношення висоти щілини ежекції до ширини ванни;

$x_4 = Ar$ - число Архімеда.

Функція відгуку служить ефективність системи η – співвідношення вловленого та тепла, що виділяється від нагрітої поверхні дзеркала ванни.

Експериментальні дослідження ефективності стенда проводились при таких умовах та спрощеннях: висота відсмоктуючої щілини і відстань від її низу до дзеркала ванни не змінювалась; лінійні розміри ванни не змінювались; відстань між припливним отвором і стоком змінювалась в межах $b = (0,05...0,25)l_{bath}$, висота щілини ежекції варіювалась в межах $(1,5...2,5)b$ висоти припливного отвору, швидкість на виході з припливної щілини знаходилась в межах $v_{in} = (2,2 \dots 3,1)v_l$ від швидкості на всмоктуванні. Надлишкова температура поверхні нагрівального елемента, що імітує дзеркало рідини змінювалась від 5 до 50 °С.

В результаті проведених експериментів отримано локальні та середні значення швидкостей потоків та побудовано їх профілі по перерізу ванни на різних висотах (рис. 7, 8, 9). Максимальна величина розходження експериментальних та теоретичних даних не перевищує 9%.

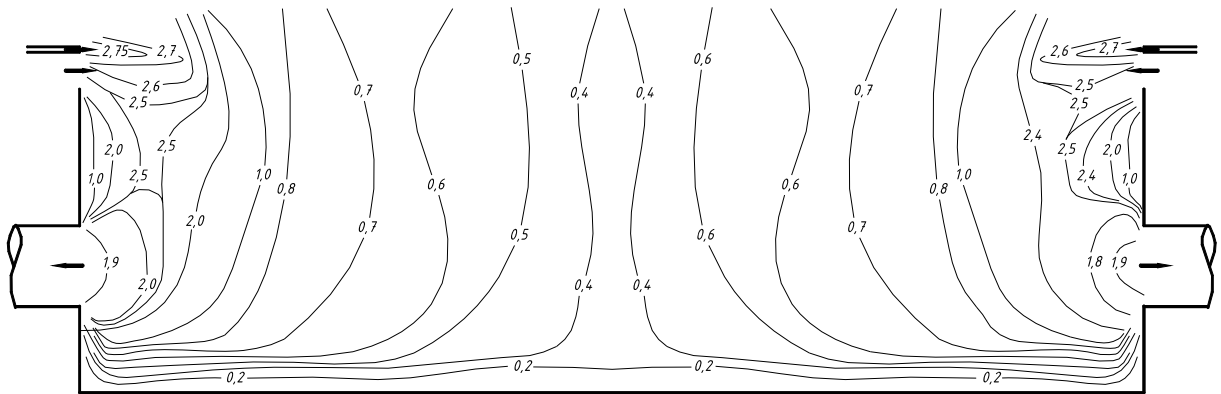


Рис.7. Характерний результат визначення поля швидкості, м/с, при $b_{wal}/b = 0,1$, $b_{inj}/b_{wall} = 0,25$, $v_{in}/v_l = 1,5$, $v_{in} = 3$ м/с

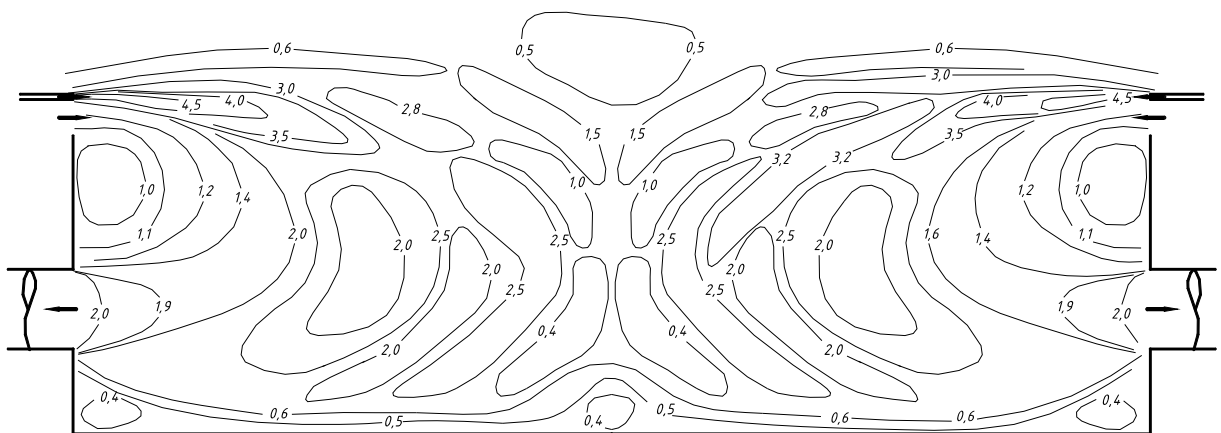


Рис.8. Характерний результат визначення поля швидкості, м/с, при $b_{wal}/b = 0,1$, $b_{inj}/b_{wall} = 0,25$, $v_{in}/v_l = 2,25$, $v_{in} = 4,5$ м/с

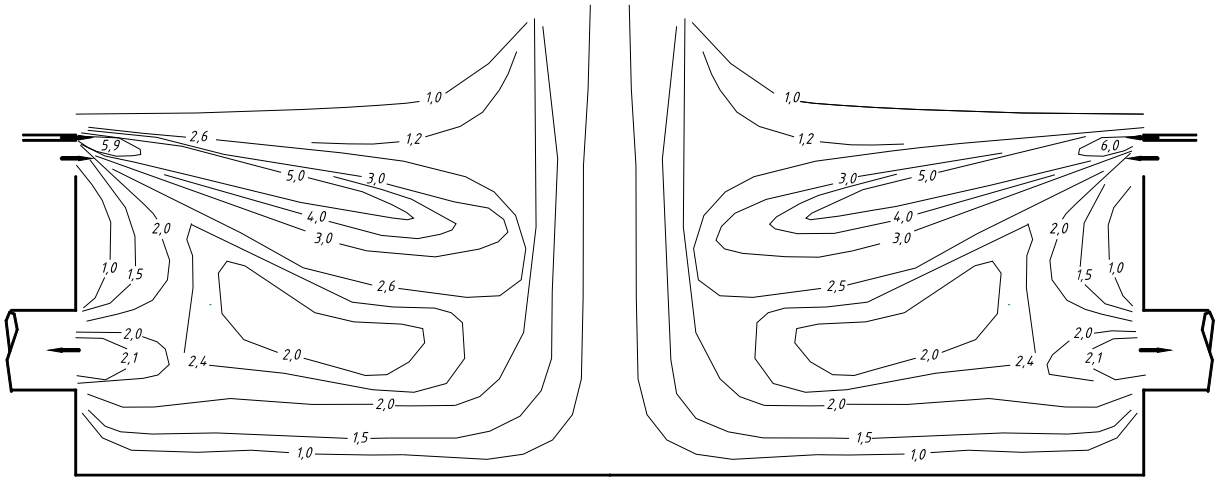


Рис.9. Характерний результат визначення поля швидкості, м/с, при $b_{wal}/b = 0,1$, $b_{inj}/b_{wall} = 0,25$, $v_{in}/v_{\ell} = 3$, $v_{in} = 6$ м/с

На основі експериментальних досліджень отримано рівняння регресії для визначення ефективності системи в залежності безрозмірних величин витрати припливного та видаляемого повітря, відношення висоти щілини ежекції та висоти непроникної стінки борта відносно ширини ванни, а також від температури поверхні ванни.

$$\eta = 0,8405 + 1,3887x_1 - 0,1555x_2 + 0,1912x_3 + 0,6687x_1x_3 - 1,0683x_1x_4 - 0,0725x_2x_4 - 1,3104x_1x_2x_4 - 0,0807x_2x_3x_4 \quad (9)$$

Підставивши відповідні значення отримано:

$$\eta = 0,8405 + 1,3887 \frac{L_{in}}{L_l} + 0,1912 \frac{b_{inj}}{l} + 0,155Ar + 0,6687 \frac{L_{in}}{L_l} \frac{b_{inj}}{l} - 1,0683 \frac{L_{in}}{L_l} Ar - 0,0725 \frac{b_{wal}}{l} Ar - 1,3104 \frac{L_{in}}{L_l} \frac{b_{wal}}{l} Ar - 0,0807 \frac{b_{wal}}{l} \frac{b_{inj}}{l} Ar \quad (10)$$

Рівняння регресії в іншому вигляді:

$$\eta = \left(0,8405 + 0,1912 \frac{b_{inj}}{l} \right) + \left(1,3887 + 0,6687 \frac{b_{inj}}{l} \right) \frac{L_{in}}{L_l} + \left(0,155 - \left(0,0725 + 0,0807 \frac{b_{inj}}{l} \right) \frac{b_{wal}}{l} \right) Ar - \left(1,0683 + 1,3104 \frac{b_{wal}}{l} \right) \frac{L_{in}}{L_l} Ar \quad (11)$$

Обробка результатів експерименту здійснювалось за допомогою програми Scilab пошуком на ЕОМ методом сканування з перевіркою отриманих значень навколо точок мінімуму методом найменших квадратів. В результаті знайдено висоти щілини ежекції та непроникної стінки повітряно-струменевого перекриття та його витратні характеристики, що відповідають мінімуму розшарування температур по висоті потоку.

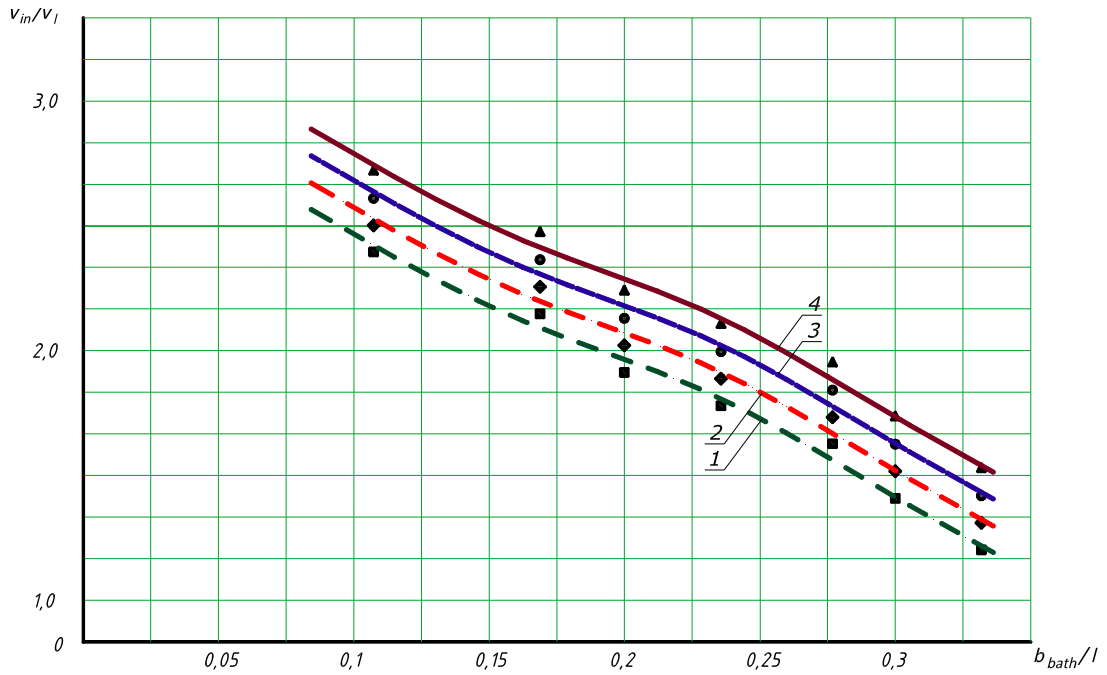


Рис.10. Загальна висота конструкції бортів ванни шириною $l=3,0$ м; $l=3,5$ м; $l=4,0$ м; $l=4,5$ м обладнаних дворівневим повітряно-струминним екраном при номінальній ефективності $\eta=0,9$ в залежності від співвідношення швидкостей припливу і відсмоктування. Температура поверхні ванни $t=30,7$ °С.

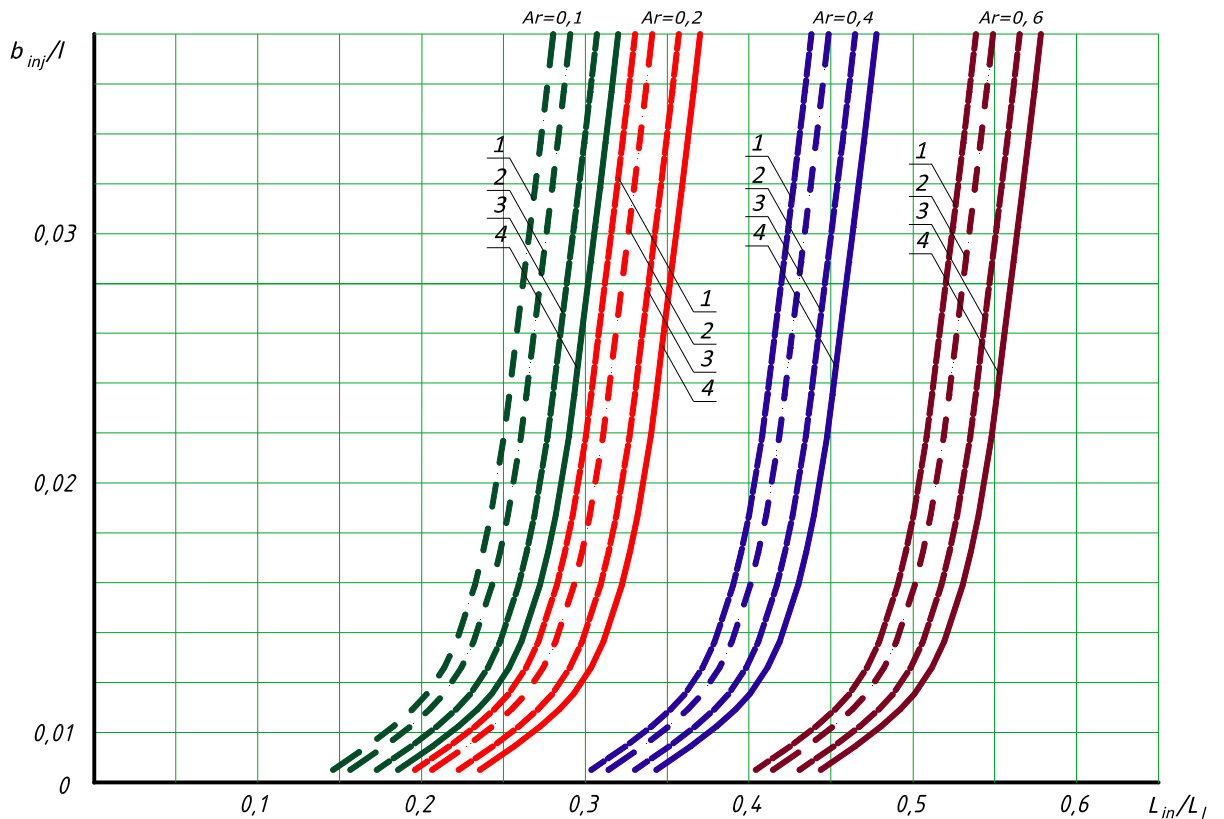


Рис.11. Оцінка конструктивних особливостей при номінальній ефективності $\eta=0,9$ в залежності від кількості припливного повітря і температури поверхні рідини при
1. $b_{wal}/l = 0,11$; 2. $b_{wal}/l = 0,09$; 3. $b_{wal}/l = 0,08$; 4. $b_{wal}/l = 0,07$

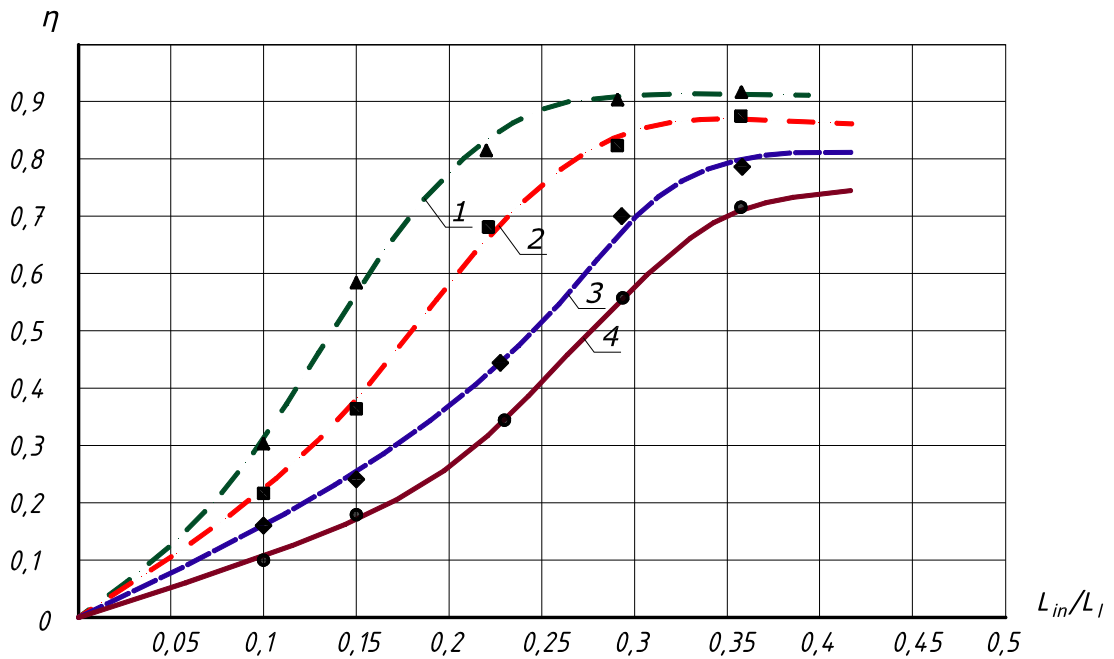


Рис.12. Залежність ефективності повітряно-струминного екрану від співвідношення витрат припливного та витяжного повітря при $b_{wat}/l = 0,07=0,07$; $b_{inj}/l = 0,017$ при числах Архімеда: 1. $Ar=0,1$; 2. $Ar=0,2$; 3. $Ar=0,4$; 4. $Ar=0,6$

У четвертому розділі для створення комп'ютерної програми з використанням запропонованих залежностей розроблено алгоритм інженерного розрахунку дворівневого повітряно-струминного екрану. Методика інженерного розрахунку запропонованої системи базується на загальновідомих системах балансових рівнянь, але з використанням залежностей, що отримані в результаті теоретичних та експериментальних досліджень.

Для оцінки економічної ефективності запропонованого рішення проведено порівняння техніко-економічних показників.

Порівняння варіантів систем локалізації з використанням дворівневого повітряно-струминного екрану показало заощадження енергії на переміщення повітря за рахунок зниження витрат повітря та утворення обертових потоків над відкритою поверхнею рідини на 14,8 %. Це підтверджує доцільність застосування систем дворівневих повітряно-струминних екранів для крупногабаритних промислових ванн.

Конструкція дворівневих повітряно-струминних екранів з ежекційною щілиною захищена деклараційним патентом України на винахід №44971 А. Технічні умови затверджуються, а методика розрахунку прийнята до проектної практики ТОВ «Конструкторське бюро інноваційних проектів» м. Київ та БМК «Енергомонтажвентиляція» м. Київ.

ВИСНОВКИ

Основні результати дисертаційного дослідження викладені у висновках, які зводяться до наступних положень.

1. На підставі аналізу літературних даних і патентних досліджень щодо організації повітряно-струминних екранів над поверхнями великогабаритних ванн та

закономірностей формування струминних потоків обґрунтовано необхідність у розробці енергоощадних схем повітряних течій з обертовими потоками, що утворюються в результаті взаємодії зустрічних співвісних струмин.

2. Розроблено напрямок збільшення ефективності роботи системи місцевої вентиляції для промислових ванн зі значними поверхнями випаровування.

3. Розроблено математичну модель повітряного екрану, в якій розглядається система із взаємодією співвісних зустрічних струмин та щільних бортових відсмоктувачів і конвективних потоків від нагрітої поверхні дзеркала ванни.

4. Розроблено та сконструйовано лабораторну модель промислової ванни обладнану дворівневим повітряно-струминним екраном. На підставі експериментальних досліджень одержано співвідношення припливного повітря та обертових потоків, що відсмоктуються, для найбільш ефективного вловлювання шкідливостей. За результатами експериментів отримано функціональні залежності ефективності роботи η дворівневих повітряно-струминних екранів від температури поверхні рідини t та геометричних розмірів конструкції.

5. Розроблено та захищено патентом України енергоефективна конструкція дворівневих повітряно-струминних екранів з обертовими потоками, що використовують взаємодію співвісних зустрічних струмин.

6. На підставі теоретичних та експериментальних досліджень розроблена інженерна методика розрахунку дворівневих повітряно-струминних екранів, яка дозволяє проектувати ефективні системи локалізації та вловлювання шкідливостей з рідинної поверхні ванни. Ця методика впроваджена в проектну практику ТОВ «Конструкторське бюро інноваційних проектів» м. Київ та БМК «Енергомонтажвентиляція» м. Київ.

7. У результаті впровадження дворівневих повітряно-струминних екранів при проектуванні інженерних систем для об'єкту «Реконструкція спортивного комплексу будівлі басейну у м. Добропілля Донецької області» в приміщенні басейну досягнуто зменшення повітрообміну в порівнянні з існуючими системами.

8. Техніко-економічні розрахунки дозволяють констатувати можливість заощадження енергії на переміщення повітря при використанні дворівневих повітряно-струминних екранів, у розмірі 14,8% та заощадження капітальних вкладень в обсязі 12,8% у порівнянні з діючими системами вентиляції.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях іноземних держав, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. V.Korbut, S.Rybachov. Investigation of the conditions of localization of pollutants of air-jetprotection from the exposedsurfaces of large industrial baths. Technical University of Kosice. Civil Engineering fakulty. Non-ConferenceProceedingsofScientificPapers – KEGA 052TUKE-4/2013. – 2015. ISBN: 978-80-553-2438-8. – p.11 – 15. Cassotherm 2016

(Особистий внесок здобувача – теоретичні дослідження процесів локалізації дифузійних шкідливих речовин, розроблення математичної моделі процесів взаємодії повітряних потоків над поверхнею рідини у ванні участь у підготовці та написанні статті).

Статті у фахових виданнях:

2. Корбут, В. П.; Рибачов, С. Г. Удосконалення пристроїв повітряно-струминного огороження відкритої поверхні великорозмірних ванн. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Науково-технічний збірник КНУБА, К.:2014 №17, с. 26-31.

(Особистий внесок здобувача – проведення та оформлення розрахунків, участь у підготовці та написанні статті).

3. Корбут В. П., Рибачов С. Г. Дослідження дворівневого повітряно-струминного огороження відкритої поверхні великорозмірних промислових ванн. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Науково-технічний збірник КНУБА, К.:2018 №24, с. 5-10

(Особистий внесок здобувача – проведення та оформлення розрахунків, участь у підготовці та написанні статті).

4. с

(Особистий внесок здобувача – проведення та оформлення розрахунків, участь у підготовці та написанні статті).

5. Рибачов С. Г. Оцінка енергоефективної роботи дворівневого повітряно-струминного екрану зі співвісними зустрічними струминами з ежекційним підживленням у сполученні з обертовими потоками. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Науково-технічний збірник КНУБА, К.:2021 №38, с. 5-10

(Особистий внесок здобувача – проведення та оформлення розрахунків, участь у підготовці та написанні статті).

6. Патент № А 44971 UA 7 F 24 F 13/06. Пристрій для видалення шкідливих виділень. / Корбут В. П., Склярєнко О. М., Рибачов С. Г. // Промислова власність. – 2021. – №3. Кн.1. – С. 4.82

(Особистий внесок здобувача – розробка конструкції дворівневих повітряно-струминних екранів з обертовими потоками).

АНОТАЦІЯ

Рибачов С.Г. Енергоефективне повітряно-струминне екранування крупногабаритних промислових ванн. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.03 – Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2021.

Робота присвячена вирішенню актуальної задачі створення енергоефективних конструктивних рішень повітряно-струминного екранування крупногабаритних промислових ванн. Розроблено математичну модель повітряного екрану, в якій розглядаються співвісні зустрічні струмини з ежекційним підживленням у сполученні з обертовими потоками, що утворюють стійке захисне поле при випаровуванні шкідливої рідини з промислової ванни. Показано, що для досягнення максимальної ефективності вловлювання і локалізації шкідливостей необхідно дотримуватись співвідношення припливного повітря та обертового потоку, що відсмоктується. Виконані експериментальні дослідження на моделі промислової ванни з повітряно-струминним екрануванням для визначення закономірностей найбільш ефективного

вловлювання шкідливостей при оптимальних конструктивних параметрах дворівневої припливно-витяжної системи.

Розроблені та захищено патентом України конструкція дворівневих повітряно-струменевих екранів промислових ванн великогабаритних розмірів з обертовими потоками, що утворюються в результаті взаємодії зустрічних співвісних струмин. Створено методику розрахунку таких систем.

Показана економічна ефективність використання розроблених пристроїв в порівнянні з альтернативними варіантами, наведені питомі показники енергоефективності.

Ключові слова: вентиляція, зустрічні співвісні струмини, дворівневі, повітряно-струменеві, енергозбереження, обертові потоки, ванни, взаємодія струмин.

АННОТАЦИЯ

Рыбачов С. Г. Энергоэффективное воздушно-струйное экранирование крупногабаритных промышленных ванн. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 – Вентиляция, освещение и теплогаснабжение. – Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, 2021.

Работа посвящена решению актуальной задачи создания энергоэффективных систем воздушно-струйного экранирование крупногабаритных промышленных ванн.

На основании анализа литературных данных относительно организации местной вытяжной вентиляции в производственных помещениях оборудованных крупногабаритными ваннами с целью обеспечения максимально эффективного укрытия поверхности жидкости предложено схему двухуровневого воздушно-струйного укрытия.

Разработана математическая модель воздушного экрана, в которой рассматриваются соосных встречные струи с эжекционной подпиткой в сочетании с вращающимися потоками, образующие устойчивое защитное поле при испарении вредностей с поверхности жидкости промышленной ванны. На базе математической модели воздушных потоков и результатов экспериментальных исследований обоснована целесообразность использования систем в производственных помещениях с крупногабаритными промышленными ваннами.

Показано, что достижение максимальной эффективности и дальнотойности экранирующих струй обеспечивается подпиткой воздухом в нижнюю часть и создания потоков вращения над поверхностью жидкости.

Разработана и исследована конструкция двобортовых двухуровневых воздушно-струйных укрытий с образованием потоков вращения над поверхностью жидкости, которые обеспечивают перекрытие зеркала ванны и направляют вредности в сторону бортовых отсосов. Определены графические и аналитические зависимости на основании проведенных экспериментов для использования в последующих инженерных расчетах.

Разработаны и защищены патентом Украины конструкция двухуровневых воздушно-струйных укрытий с эжекционной подпиткой. На основании аналитических и экспериментальных исследований получены расчетные зависимости и графики для определения геометрических характеристик и соотношения скоростей воздушно-струйных укрытий.

На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана методика расчета двобортовых двухуровневых воздушно-струйных укрытий, которая позволяет проектировать эффективные системы локализации и удаления вредностей с поверхности крупногабаритных ванн. Эта методика внедрена в производство.

Показана экономическая эффективность использования разработанных устройств в сравнении с альтернативными вариантами, приведены удельные показатели энергоэффективности.

Ключевые слова: вентиляция, встречные соосные струи, двухуровневые, воздушно-струйные, энергосбережения, вращающиеся потоки, ванны, взаимодействие струй.

SUMMARY

Ribachov S.G. Energy efficient cleaning and strumming of large industrial baths. - The Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.23.03 - Ventilation, lighting and heat and gas supply. - Kiev National University of Construction and Architecture, Kiev, 2021.

The work is devoted to solving the urgent problem of creating energy-efficient systems for air-jet shielding of large industrial baths.

Based on the analysis of literature data on the organization of local exhaust ventilation in industrial premises equipped with large-sized baths in order to ensure the most effective cover of the liquid surface, a scheme of a two-level air-jet shelter was proposed.

A mathematical model of an air screen has been developed, in which coaxial counter jets with ejection feed in combination with rotating flows are considered, which form a stable protective field during evaporation of harmful substances from the surface of an industrial bath liquid. On the basis of a mathematical model of air flows and the results of experimental studies, the expediency of using the systems in industrial premises with large industrial baths has been substantiated.

It is shown that the achievement of the maximum efficiency and range of the shielding jets is ensured by feeding air into the lower part and creating flows of rotation above the liquid surface.

The design of double-sided two-level air-jet shelters with the formation of flows of rotation above the surface of the liquid, which provide overlap of the bath mirror and direct harmfulness towards the side suction, has been developed and investigated. Graphical and analytical dependencies were determined based on the performed experiments for use in subsequent engineering calculations.

The design of two-level air-jet shelters with ejection feed has been developed and protected by a patent of Ukraine. On the basis of analytical and experimental studies,

calculated dependences and graphs were obtained to determine the geometric characteristics and the ratio of the speeds of air-jet shelters.

On the basis of theoretical and experimental studies, a method has been developed for calculating double-sided two-level air-jet shelters, which makes it possible to design effective systems for the localization and removal of hazards from the surface of large-sized bathtubs. This technique has been introduced into production.

The economic efficiency of using the developed devices is shown in comparison with alternative options, the specific indicators of energy efficiency are given.

Key words: ventilation, counter coaxial jets, two-level, air-jet, energy saving, rotating flows, baths, jet interaction.