

УДК 697.92

## Дослідження дворівневого повітряно-струминного огородження відкритої поверхні великорозмірних ванн

В. П. Корбут<sup>1</sup>, С. Г. Рибачов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, predsedatel@emw.kiev.ua  
ORCID: 0000-0002-0831-2477

<sup>2</sup>ас. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, 9599770@i.ua

*Анотація.* У вентиляційній практиці знаходять широке застосування повітряно-струминні огородження, які використовуються для відокремлення зони зі сприятливими параметрами від зони з менш сприятливими параметрами повітряного середовища. Найчастіше застосовують повітряно-струминні огородження у виробничих приміщеннях. Повітряна плоска струмина відокремлює джерело шкідливих виділень від повітряного середовища приміщення, а також транспортує шкідливості, що потрапили в повітряний потік до місця їхнього вловлювання. За таким принципом влаштовуються різноманітні активовані місцеві відсмоктувачі. Наразі великого поширення для вирішення завдань аеродинаміки вентиляції, зокрема для розрахунку струминних течій і течій поблизу стоків, розроблено чисельні методи CFD моделювання (Computational Fluid Dynamics – обчислювальна гідромеханіка). Метою є визначення основних кількісних співвідношень для влаштування повітряно-струминної огорожі над дзеркалом рідини, що працює в режимі граничного вловлювання за допомогою методу CFD моделювання. Розглядається об'ємна задача про взаємодію припливних струмин, що виходять із вузьких щілинних отворів у напрямку один проти одного та щілинних стоків під припливними насадками. Розрахункова область течії обмежується поверхнею дзеркала рідини у ванні, бортами ванни й умовними межами над ванною. Використовувалася стандартна  $k-\epsilon$ -модель турбулентних течій. При цьому вважалося, що турбулентність породжується припливними струминами й завихреннями на кутах твердих стінок. Зовнішні потоки повітря, що підтікають до струмин і до отвору всмоктування на вільних межах області розрахунку, приймалися не турбулізованими. Отримано поля розподілу температури та швидкості повітряних потоків для екранування дзеркала ванни. Також уточнено співвідношення витрат припливного повітря та повітря, що відсмоктується, для найбільш ефективного вловлювання шкідливостей.

*Ключові слова:* бортовий відсмоктувач, дворівневий відсмоктувач, розподіл концентрації, комп'ютерне моделювання.

**Вступ.** У вентиляційній практиці знаходять широке застосування повітряно-струминні огорожі, які використовуються для відокремлення зони зі сприятливими параметрами від зони з менш сприятливими параметрами повітряного середовища. Таким прикладом є різноманітні варіанти повітряно-теплових завіс, що захищають внутрішнє середовище приміщення від впливу зовнішнього холодного повітря в холодний період року та підвищують температуру повітря в зоні прорізів воріт і дверей [1].

Найчастіше застосовують повітряно-струминні огородження у виробничих приміщеннях. Повітряна плоска струмина відокремлює джерело шкідливих виділень від повітряного середовища приміщення, а також транспортує шкідливості, що потрапили в повітряний потік, до місця їхнього вловлювання. За таким принципом влаштовуються різноманітні активовані місцеві відсмоктувачі [1].

**Актуальність дослідження.** Внутрішнє повітряне середовище цехів, обладнаних промисловими ваннами зі шкідливими речовинами, забруднене парами цих речовин. Це погіршує здоров'я та працездатність людей, пошкоджує огорожувальні конструкції тощо. Тому ефективне

вловлювання парів шкідливих речовин від ванн є актуальною задачею, яка вирішується в даній роботі.

**Останні дослідження та публікації.** Для вловлювання шкідливих парів, що виділяються від ванн, використовують бортові відсмоктувачі. Серед варіантів активованих бортових відсмоктувачів найчастіше зустрічаються розташовані на одній осі припливний насадок і щілинний стік над дзеркалом рідини. Однак, якщо промислова ванна використовується для обробки великогабаритних виробів і, відповідно, має значні розміри (біля 3 м), традиційні засоби й конструктивні рішення для видалення шкідливостей є недостатньо ефективними.

В основі методу розрахунку активованих відсмоктувачів лежить аналітичне дослідження взаємодії плоских струмин і щілинних стоків, що використовує спосіб накладання потоків і базується на методі інтегральних співвідношень [1]. Як правило, розглядають взаємодію струмин і стоків при їхньому розташуванні на одній осі далеко від будь-яких обмежувальних поверхонь.

З метою збільшення ефективності роботи бортових відсмоктувачів біля обладнання зі значними відкритими поверхнями (завширшки до

10 м) токсичної рідини нами були запропоновані дворівневі динамічні огороження, які повинні практично усунути надходження токсичних речовин до навколишнього повітряного середовища [2]. Конструктивно вони використовуються таким чином. Вздовж двох протилежних бортів ванни встановлюються щільні відсмоктувачі. Над ними розміщуються припливні горизонтальні плоскі патрубки. Дворівневе перекриття дозволяє значно зменшити швидкість повітря в поверхневому шарі порівняно з активованими відсмоктувачами. При взаємодії з мінімальною швидкістю далекобійних асиметричних плоских струмин створюється динамічне огороження для всмоктування забрудненого повітря з утвореного внутрішнього об'єму.

Наразі великого поширення для вирішення завдань аеродинаміки вентиляції, зокрема для розрахунку струминних течій і течій поблизу стоків, розроблені чисельні методи CFD моделювання (Computational Fluid Dynamics – обчислювальна гідромеханіка) [3-7 та ін.].

**Формулювання цілей статті.** Метою даної роботи є визначення основних кількісних співвідношень для влаштування повітряно-струминної огорожі над дзеркалом рідини, що працює в режимі граничного вловлювання за допомогою методу CFD моделювання.

**Матеріали та методи.** У даній роботі розглядається плоска (двовимірна) задача про взаємодію припливних струмин, що виходять із вузьких щілинних отворів у напрямку один проти одного, та щілинних стоків під насадками припливу. Розрахункова область течії обмежується поверхнею дзеркала рідини у ванні, бортами ванни й умовними межами (рис. 1).

Розрахунки виконувалися методом CFD для ванни завширшки  $\ell = 1,2$  м. З двох боків ванни влаштовані активовані повітряно-струминні ого-

родження на всю довжину ванни. Висота припливних щілин була задана  $d_4 = 0,01$  м, що характерно для таких пристроїв і дозволяє розглядати плоскі припливні струмини як струмини-джерела. Відстань від дзеркала рідини до осі системи струмин-стоків не змінювалася ( $d_1 = 0,09$  м). Відстань між осями припливних і відсмоктувальних щілин змінювалася у широких межах ( $d_3 = 0,05 \dots 0,7$  м). Разом з цією відстанню відповідно змінювалася висота бортів ванни.

При виконанні чисельних розрахунків швидкість витікання припливної струмини варіювалася у межах  $v_1 = 3 \dots 15$  м/с. У свою чергу, швидкість всмоктування була в межах  $v_2 = 1,5 \dots 5$  м/с. Такий діапазон регламентувався обмеженням швидкості потоку повітря для уникнення відриву часток та зменшення тепломасообміну на поверхні рідини.

Для розв'язання задачі знаходилася така мінімальна величина швидкості, за якої спостерігається повне вловлювання шкідливостей з поверхні рідини ванни. Мінімальній величині швидкості всмоктування при заданій ширині стоку відповідає мінімальна витрата повітря, що видаляється стоком. Така витрата повітря забезпечує повне вловлювання забруднень, що потрапляють до повітряно-струминного екрана і, в той же час є найбільш вигідною за експлуатаційними витратами.

Про повне або неповне вловлювання забруднень можна зробити висновок з картини течії поблизу щілинного стоку, що подається у вигляді ліній течії (рис 2).

При повному перекритті поверхні припливними струминами всі лінії течії замикаються на отворах всмоктування. Частково відбувається підсмоктування повітря з навколишнього середовища.

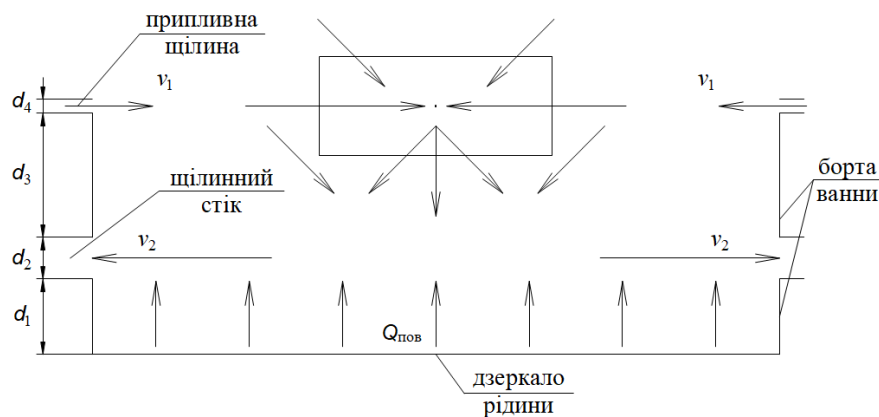


Рис.1 Розрахункова схема повітряно-струминного огороження відкритої поверхні великорозмірних ванн

Достатньо незначно змінити співвідношення швидкості припливу і всмоктування в бік останнього (у розрахунках приблизно на 3-5 %), і частина ліній течії буде йти до простору за щілинами всмоктування, що свідчить про неповне екранування поверхні рідини.

Таким чином, при заданій геометричній формі і розмірах ванни варіюванням співвідношення швидкості припливу й відсмоктування, а також, зміненням відстані між припливними і відсмоктувальними щілинами можна підібрати режими, що відповідатимуть повному вловлюванню шкідливостей при мінімальній витраті повітря припливу й відсмоктування.

При виконанні чисельних розрахунків задавалися межі області течії: непроникні тверді межі – це поверхня дзеркала рідини, борта ванни, зовнішня поверхня щілин припливу і стоку; розрахункова область – прямокутний паралелепіпед, що охоплює зону основної течії.

На вільних межах тиск приймався рівним атмосферному, а лінії течії спрямованими перпендикулярно цим межах. У площині припливного та всмоктувального отворів задавалися, відповідно, значення швидкості  $v_1$  і  $v_2$ , м/с. Навколишнє та припливне повітря має температуру  $T = 293$  К.

Використовувалася стандартна  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентності. Вважалось, що турбулентність потоків породжується припливними струминами й завихреннями на кутах твердих стінок, а зовнішні потоки повітря, що підтікають до струмин і до отвору всмоктування на вільних межах області розрахунку, не турбулізовані.

Для проведення чисельного розв'язання вся область течії покривалася розрахунковою сіткою. Потім у ході виконання обчислень початкова сітка дробилася. При цьому найбільше дроблення проводилося в зонах найбільших змін швидкості течії. В осередках розрахункової сітки вирішувалася система рівнянь турбулентного руху і нерозривності. Розв'язання виконувалось ітераційним методом. Нев'язки ітераційного процесу для всіх контрольованих параметрів розрахунку (компоненти швидкості, нерозривність потоку, характеристики турбулентності течії  $k$  та  $\epsilon$ ) встановлювалися величиною 0,0001.

Збіжність результатів розрахунку в ході дроблення розрахункової сітки можна бачити з динаміки зміни характерної величини. Цією величиною приймалася повздовжня складова швидкості потоку в точці, розташованій на рівні верху всмоктувальної щілини і на відстані 0,1 м від

неї. Точність розрахунку вважалася досягнутою, якщо повздовжня компонента швидкості в розрахунковій точці в ході подрібнення сітки не змінювалася більш ніж на 0,5 % свого попереднього значення, а картина потоків у вигляді ліній течії залишається стабільною.

При невеликій відстані між осями припливних і відсмоктувальних щілин (від 0,01 до 0,55 м) припливні струмини не встигають екранувати поверхню рідини, а відразу всмоктуються.

Для створення граничного режиму вловлювання необхідно збільшити відстань між осями припливних отворів і отворів відсмоктування (від 0,67 до 0,75 м) при збереженні співвідношення швидкості припливу й відсмоктування. При такому рішенні струмини розвиваються практично в напрямку їхнього випуску і відхиляються в напрямку до точок всмоктування відносно імпульсу, якого вони отримали

**Результати досліджень.** Характерні картини потоків у режимі граничного вловлювання мінімальними витратами у стоку повітря представлені на рис. 2-7.

Маса шкідливих викидів з ванни оцінюється за потоком температури, якому відповідає значення інтегралу,  $m^2 \cdot K/c$ , від добутку

$$G = \int_{x_1}^{x_2} v \Delta t dx,$$

де значення повздовжніх координат  $x_1$  і  $x_2$ , м, обмежують ділянки верхнього зрізу ванни, на яких значення вертикальної швидкості  $v$ , м/с, позитивні. Саме позитивні значення швидкості  $v$ , м/с, визначають потік шкідливих парів за межі ванни.

Виконані розрахунки показують, що при фіксованій швидкості відсмоктування  $v_{\text{від}} = 1,5$  м/с й варіюванні швидкості припливного повітря  $v_{\text{припл}} = 0 \dots 15$  м/с маса шкідливих викидів та тепловий потік будуть найменшими ( $G = 0,498$   $m^2 \cdot K/c$ ) за умови видалення забрудненого повітря зі швидкістю  $v_{\text{від}} = 1,5$  м/с і при швидкості припливної струмини  $v_{\text{припл}} = 11$  м/с.

Таким чином, представлений матеріал, отриманий на основі чисельного дослідження, складає основу більш точного методу розрахунку подібних пристроїв. Він дозволяє більш повно враховувати особливості взаємодії плоских струмин зі щілинними стоками при їхньому розташуванні поблизу дзеркала рідини у ванні.

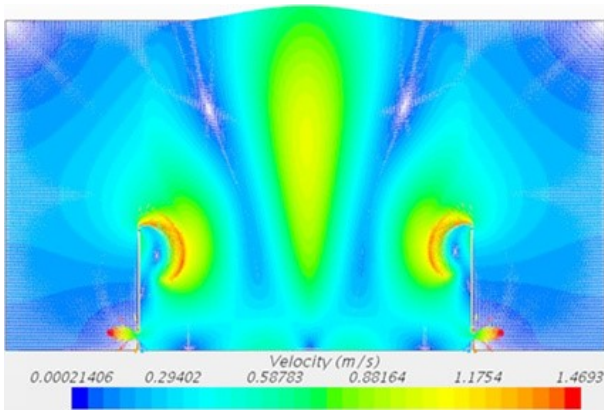


Рис. 2. Поле швидкості над ванною при відстані між щілинами притоку і видалення  $d_3 = 0,7$  м за умов видалення забрудненого повітря  $v_{\text{вид}} = 1,5$  м/с і відсутності припливної струмینی  $v_{\text{припл}} = 0$

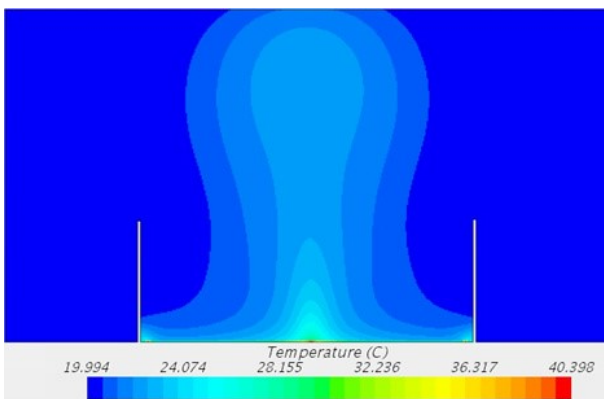


Рис. 3. Поле температури над ванною при відстані між щілинами притоку і видалення  $d_3 = 0,7$  м за умов видалення забрудненого повітря  $v_{\text{вид}} = 1,5$  м/с і відсутності припливної струмینی  $v_{\text{припл}} = 0$

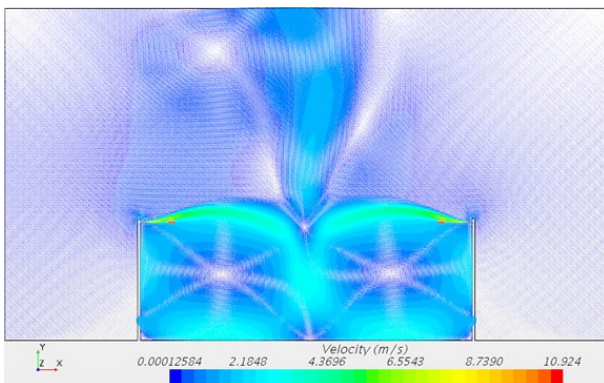


Рис. 4. Поле швидкості над ванною при відстані між щілинами припливу й видалення  $d_3 = 0,7$  м за умов видалення забрудненого повітря  $v_{\text{вид}} = 1,5$  м/с і відсутності припливної струмینی  $v_{\text{припл}} = 11$  м/с

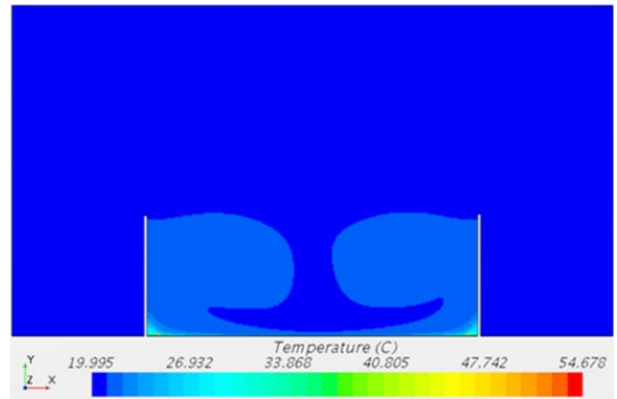


Рис. 5. Поле температури над ванною при відстані між щілинами притоку і видалення  $d_3 = 0,7$  м за умов видалення забрудненого повітря  $v_{\text{вид}} = 1,5$  м/с і відсутності припливної струмینی  $v_{\text{припл}} = 11$  м/с

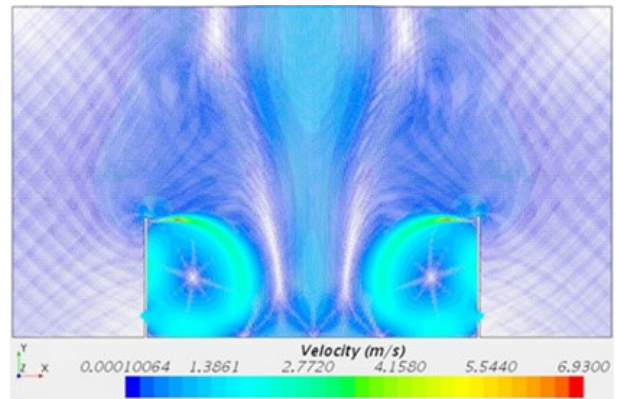


Рис. 6. Поле швидкості над ванною при відстані між щілинами притоку і видалення  $d_3 = 0,7$  м за умов видалення забрудненого повітря  $v_{\text{вид}} = 1,5$  м/с і відсутності припливної струмینی  $v_{\text{припл}} = 7$  м/с

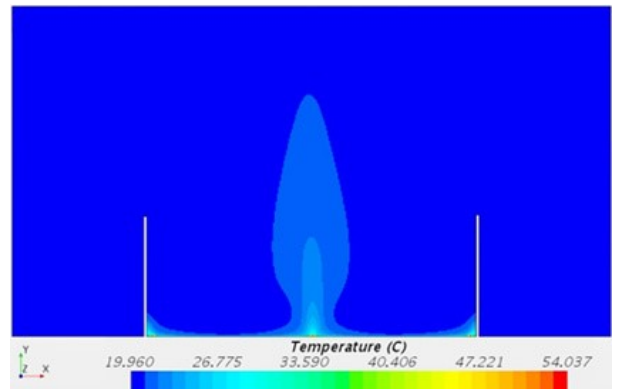


Рис. 7. Поле температури над ванною при відстані між щілинами припливу й видалення  $d_3 = 0,7$  м за умов видалення забрудненого повітря  $v_{\text{вид}} = 1,5$  м/с і відсутності припливної струмینی  $v_{\text{припл}} = 7$  м/с

**Висновки.** Моделювання підтвердило ефективну роботу припливно-витяжних дворівневих бортових відсмоктувачів для великорозмірних промислових ванн. Це дозволяє практично повністю ліквідувати надходження шкідливостей до

робочої зони. У результаті отримані кількісні характеристики, що пов'язують параметри плоских припливних струмін і щілинних стоків у режимі граничного уловлювання.



### Література

1. Посохин В. Н. Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования / В. Н. Посохин. – Москва: Машиностроение, 1984. – 160 с.
2. Корбут В. П. Удосконалення пристроїв повітряноструминного огороження відкритої поверхні великорозмірних ванн / В. П. Корбут, С. Г. Рыбачов // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. – 2014. – Вип. 17. – с. 26-31.
3. Цуляну К. Р. Моделирование работы щелевого отсоса взаимодействующего с плоской газовой струей / К. Р. Цуляну, В. Г. Гуцул, О. Н. Зайцев, Н. П. Богатикова // Строительство и безопасность. – 2012. – Вып. 41. – с. 235-239.
4. Варсегова Е. В. Об условия предельного улавливания потока вредных выделений местным отсосом / Е. В. Варсегова, В. Н. Посохин // Известия вузов. Строительство. – 2015. - № 11-12. – с. 18-22.
5. Wang L. Investigation of the Impact of Building Entrance Air Curtain on Whole Building Energy Use / L. Wang // Air Curtain Study. – 2013. – Режим доступа: <http://www.amca.org/UserFiles/file/Energy%20Initiative%20Web%20Pages/Air%20Curtain%20Study.pdf>
6. Nitin Kardekar. Numerical analysis of air flow velocity streamlines of air curtains / Nitin Kardekar, V. K. Bhojwani, N. K. Sane // International journal of mechanical engineering and technology (IJMET). – 2013. – Vol. 4, Iss. 5 – pp. 150-155.
7. Polak J. Experimental study of the airflow distribution in a room with heating equipment / J. Polak. – Norwegian University of Science and Technology, 2015. – 95 с.

### References

1. Posokhin V. N. *Raschet mestnykh otsosov ot teplo- i gazovydeliayushchego oborudovaniia*. Mashinostroenie, 1984.
2. Korbut V. P., Rybachov S. G. “Udoskonalennia prystroiv povitrianostrumynnoho ohorodzhennia vidkrytoi poverkhni velykorozmirmnykh vann.” *Ventyliatsiia, osvittlennia ta teplohazopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 17, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2014, pp. 26-31.
3. Tsuljan K. R., Gutsul V. G., Zaytsev O. N., Bohatikova N. P. “Modelirovanie raboty shchelevogo otsosa vzaimodeistvuiushchego s ploskoi gazovoi struei.” *Stroitelstvo i bezopasnost*, vol. 41, 2012, pp. 235-239.
4. Varshegova E. V., Posokhin V. N. “Ob uslovii predelnogo ulavlivaniia potoka vrednykh vydelenii mestnym otsosom.” *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*, no. 11-12, 2015, pp. 18-22.
5. Wang L. “Investigation of the Impact of Building Entrance Air Curtain on Whole Building Energy Use.” *Air Curtain Study*, 2013, <http://www.amca.org/UserFiles/file/Energy%20Initiative%20Web%20Pages/Air%20Curtain%20Study.pdf>
6. Nitin Kardekar, Bhojwani V. K., Dr. Sane N. K. “Numerical analysis of air flow velocity streamlines of air curtains” *International journal of mechanical engineering and technology (IJMET)*, Vol. 4, Iss. 5, 2013, pp. 150-155.
7. Polak J. *Experimental study of the airflow distribution in a room with heating equipment*. Norwegian University of Science and Technology, 2015.

УДК 697.92

## Исследование двухуровневого воздушно-струйного ограждения открытой поверхности крупноразмерных промышленных ванн

В. П. Корбут<sup>1</sup>, С. Г. Рыбачов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [predsdatel@emw.kiev.ua](mailto:predsdatel@emw.kiev.ua),  
ORCID: 0000-0002-0831-2477

<sup>2</sup>ас. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, [9599770@i.ua](mailto:9599770@i.ua)

*Аннотация. В вентиляционной практике находят широкое применение воздушно-струйные ограждения, которые используются для отделения зоны с благоприятными параметрами от зоны с менее благоприятными параметрами воздушной среды. Чаще всего применяют воздушно-струйные ограждения в производственных помещениях. Воздушная плоская струя отделяет источник вредных выделений от воздушной среды помещения, а также транспортирует вредности, попавшие в воздушный поток, к месту их улавливания. По такому принципу работает много разновидностей активированных местных отсосов. Сейчас большое распространение для решения задач аэродинамики вентиляции, в частности для расчёта струйных течений и течений вблизи стоков, получили численные методы CFD моделирования (Computational Fluid Dynamics). Целью является определение основных количественных соотношений для устройства воздушно-струйного ограждения над зеркалом жидкости, работающего в режиме предельного улавливания с помощью метода CFD моделирования. Рассматривается объёмная задача о взаимодействии приточных*

*струи, выходящих из узких щелевых отверстий в направлении друг против друга и щелевых стоков под насадками притока. Расчётная область течения ограничивается поверхностью зеркала воды в ванне, бортами ванны и условными границами над ванной. Использовалась стандартная  $k-\epsilon$ -модель турбулентных потоков. Считалось, что турбулентность порождается приточными струями и завихрениями на углах твёрдых стенок, а внешние потоки подтекающего воздуха к отверстиям всасывания не турбулизованы. Получены поля распределения температуры и скорости воздушных потоков для экранирования зеркала ванны. Также уточнено соотношение расходов приточного и отсасываемого воздуха для наиболее эффективного улавливания вредностей.*

*Ключевые слова: бортовой отсос, двухуровневый отсос, распределение концентрации, компьютерное моделирование.*

**UDC 697.92**

## **Investigation of Two-Level Air-Jet Fencing of Open Surface of Large-Sized Industrial Baths**

V. P. Korbut<sup>1</sup>, S. G. Rybachov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sc.D, professor. National University of Construction and Architecture, City Kiev, Ukraine, predsedatel@emw.kiev.ua, ORCID: 0000-0002-0831-2477

<sup>2</sup> assistant Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, Ukraine, 9599770@i.ua

*In ventilation practice, air-jet fences are widely used, which are used to separate a zone with favourable parameters from a zone with less favourable air parameters. Most often, air-jet fences are used in industrial premises. An air flat jet separates the source of harmful emissions from the air in the room, and conveys the hazards that get into the air stream to the point of their capture. According to this principle, there are many different types of activated local suction. Numerical methods of CFD modelling (Computational Fluid Dynamics) have now become widespread for solving the problems of aerodynamics of ventilation, in particular, for the calculation of jet flows and flows around drains. The aim is to determine the basic quantitative relationships for the air-jet fencing device above the liquid mirror operating in the limit-capture mode, using the CFD simulation method. We consider a volumetric problem of the interaction of supply jets from narrow slot holes in the direction opposite to each other and the drain slots under the inlet ones. The calculated flow area is limited by the surface of the water mirror in the bath, the sides of the bath and the conditional boundaries above the bath. The standard  $k-\epsilon$  model of turbulence was used. It was assumed that the supply jets and vortices at the corners of the solid walls generate turbulence. The external flows of the flowing air to the jets do not take part in the turbulence generation. Fields of distribution of temperature and velocity of air streams for shielding the bath mirror are obtained. The ratio of supply air and air, which is sucked away, for the most efficient collection of harmful substances, is also specified.*

*Keywords: board suction, two-level suction, concentration distribution, temperature distribution, computer simulation.*

Надійшла до редакції / Received 26.03.2018