

Київський національний університет будівництва і архітектури
Міністерство освіти і науки України

Київський національний університет будівництва і архітектури
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РИБАЧОВ СЕРГІЙ ГРИГОРОВИЧ

УДК 697.921

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.23.03 – Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання

192 - Будівництво та цивільна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



С.Г. Рибачов

Науковий керівник – **Корбут Вадим Павлович**, доктор технічних наук,
професор

Київ-2021

АННОТАЦІЯ

Рибачов С.Г. Енергоефективне повітряно-струминне екранування крупногабаритних промислових ванн. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.03 «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання» (192 -Будівництво та цивільна інженерія). - Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної проблеми - розробці енергоефективного повітряно-струминного екрану крупногабаритних промислових ванн.

Проведено аналіз існуючих систем локалізації та вловлювання шкідливостей з поверхні рідини крупногабаритних ванн промисловості. Визначені основні переваги активованих бортових відсмоктувачів, що працюють по схемі «струмина-відсмоктувач».

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.

Аналіз літературних джерел показав, що найбільш розповсюдженими конструкціями малогабаритних ванн для вловлювання газових і теплових потоків є місцеві відсмоктувачі відкритого типу, переважно у вигляді панелей бортових, кільцевих та одnobортовими 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.

На основі проведеного аналізу відомих даних теоретичних та експериментальних досліджень зроблено висновок про необхідність розроблення принципово нових аеродинамічних схем, особливість яких полягає у формуванні динамічних екранів з припливно-обертовими потоками. Враховуючи сучасний стан розглянутої проблеми, сформульовані основні завдання, що виконані у цій роботі.

Грунтуючись на відомих розробках систем локалізації та вловлювання шкідливостей з поверхні рідин промислових ванн, була запропонована принципова аеродинамічна схема повітряних плоских припливно-струминних та взаємодіючих з ними обертових потоків. Застосування обертових потоків потребує забезпечення їх стійкості та створення структурних форм шляхом варіювання співвідношення швидкості припливного і відсмоктувального повітря для максимально можливого вловлювання шкідливих речовин при мінімальних енерговитратах. Наведений принцип системи вентиляції при якому утворюється результуюче поле швидкостей в межах промислової ємності в роботі був прийнятий за базовий. З аналізу літературних джерел відомо, що в основі теоретичних розрахунків активованих відсмоктувачів покладено взаємодія плоских струмин і щілинних стоків, розташованих на одній осі, використовуючи найчастіше метод накладання потоків. При цьому стійкість аеродинамічної системи відносно конвективних потоків, які виникають над поверхнею випаровування в аналітичних дослідженнях не достатньо обґрунтовані. Такі припущення призводять до температурного і структурного розшарування при розвитку припливної струмини, змінюючи її траєкторію, що апріорі знижує ефективність екранування..

Вивчені особливості аеродинамічних властивостей повітряно-струминних течій у горизонтальній осьовій взаємодії зі щілинними стоками показали, що

використання існуючих конструктивних рішень активованих бортових відсмоктувачів потребують повітрообмін у великих об'ємах зі значними витратами енергоресурсів при цьому характеризуються не високими санітарно-гігієнічними показниками. Для вирішення проблемної задачі необхідні нові конструктивні розробки і методи які за особливостями формування повітряно-струминних течій, технічними рішеннями і енергетичній ефективності принципово відрізняються від тих, що використовуються.

Розроблено математичну модель турбулентного переносу імпульсу, енергії і речовини у взаємодіючих аеродинамічних процесах припливних струмин з обертовими потоками при двохрівневому екранованому захисті від шкідливих речовин над відкритими поверхнями промислових ванн.

Виконано чисельне моделювання з побудовою векторних потоків швидкостей і температур які показують, що найбільш ефективний аеродинамічний процес відбувається при застосуванні припливних струмин з ежекційним підживленням.

Визначені аналітичні залежності характерних величин для температурного поля і поля концентрацій водяної пари з чисельним розв'язанням фундаментального рівняння енергії в яке введені ефективні коефіцієнти температуропровідності і дифузії, а системи рівнянь динаміки повітряної течії визначають поля швидкості та тиску.

Розроблено та сконструйовано лабораторну модель промислової ванни обладнану дворівневим повітряно-струминним екраном. На підставі експериментальних досліджень отримано залежності співвідношення припливного повітря та повітря, що відсмоктується 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 екрану.

Проведені експериментальні дослідження запропонованої конструкції повітряно-струминного екрану на підставі чисельного моделювання. Показано, що при збільшенні відносної висоти бортів до ширини ванни ефективність вловлювання шкідливостей зростає. Стабілізація і утворення саморегульованих обертових потоків над поверхнею ванни досягається при умовах збільшення висоти бортів ванни та значеннях чисел Архімеда $Ar \leq 0,3$.

Достовірність дослідних даних забезпечена використанням методів планування експерименту, методів статистичної обробки результатів дослідження та застосуванням високоефективних математичних методів при розробці методики проведення досліджень. Одержано широкий діапазон зміни витрат повітря струмини екранування та витрат повітря відсмоктування при різних геометричних співвідношеннях висот борта ванни, щілини підсмоктування та температури рідини ванни.

На підставі експериментальних досліджень визначено ефективність роботи дворівневого повітряно-струминного екрану за різних температур поверхні рідини ванни (критерій Архімеда). Одержані емпіричні залежності для визначення витрат припливного повітря та повітря, що відсмоктується при різних співвідношеннях геометричних розмірів конструкції, що дозволяє виконувати аеродинамічний розрахунок мереж повітроводів місцевої вентиляції. Виконана якісна оцінка процесів розподілу температур в об'ємі, що обмежено поверхнею рідини та бортами ванни.

Розроблена методика розрахунку конструктивних рішень елементів дворівневого повітряно-струминного екрану з використанням аеродинамічних властивостей повітряних плоских припливно-струминних та взаємодіючих з ними обертових потоків.

Проведено техніко-економічного зіставлення існуючих систем вловлювання і локалізації технологічних шкідливостей та запропонованої. Показана економічна ефективність використання розроблених пристроїв в порівнянні з альтернативними варіантами, наведені питомі показники енергоефективності.

Практичне значення одержаних результатів. 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 та захищено патентом України пристрій для видалення шкідливих виділень.

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

Застосування вдосконаленої конструкції дворівневого повітряно-струминного екрану дозволить зменшити кількість шкідливостей, що надходять з поверхні рідини промислових ванн в середньому на 4...6 %, що в свою чергу суттєво впливає на продуктивність та енергоспоживання загальнообмінними системами вентиляції промислового комплексу.

Наукова новизна роботи.

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.

Набула 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.

Ключові слова: повітряно-струминні екрани, дворівневий, обертові потоки, промислові ванни, крупногабаритні, вловлювання шкідливостей, місцева система вентиляції.

ABSTRACT

Rybachov S.G. Energy efficient air jet shielding of large industrial baths. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences (doctor of philosophy) on a specialty 05.23.03 "Ventilation, lighting and heat and gas supply" (192 - Construction and civil engineering). - Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the decision of an actual problem - development of the energy-efficient air-jet screen of large-sized industrial baths.

The analysis of the existing systems of localization and capture of harmful substances from the surface of the liquid of large - sized baths of industry is carried out. The main advantages of the activated onboard suckers working according to the scheme "jet-sucker" are defined.

Various activated extractors in industrial shops are considered in the works of VV Baturina, VA, Butakova, VP Corbut. I.A. Шепелева, B.H. Posokhina, M.Y. Grititlina, OM Голишева, A.Ф. Story and others.

Analysis of the literature has shown that the most common designs of small baths to capture gas and heat flows are local open-type suction, mainly in the form of on-board, ring and single-board air-jet fences. Among the variants of activated suction pumps, the most common schemes are located on the same axis of the supply nozzle and the slotted drain above the liquid mirror.

Industrial baths used for the treatment of large products larger than 3 m, traditional methods and design solutions to remove hazards are not effective enough. The direction in which the means of increasing the speed of the inflowing activating jet causes the formation of waves on its open surface, increasing heat and mass transfer and the transfer of harmful substances into the environment.

On the basis of the analysis of the known data of theoretical and experimental researches the conclusion on necessity of development of essentially new aerodynamic

schemes which feature consists in formation of dynamic screens with inflow-rotating streams is made. Taking into account the current state of the considered problem, the main tasks performed in this work are formulated.

Based on the known developments of systems for localization and capture of hazards from the surface of industrial bath liquids, a basic aerodynamic scheme of air flat inflow-jet and interacting rotational flows was proposed. The use of rotating flows requires their stability and the creation of structural forms by varying the ratio of the speed of the supply and exhaust air for the maximum possible capture of harmful substances with minimal energy consumption. The given principle of the ventilation system at which the resulting field of speeds within the industrial capacity is formed in work was accepted as basic. From the analysis of literature sources it is known that the theoretical calculations of activated extractors are based on the interaction of flat jets and slotted drains located on the same axis, often using the method of overlapping flows. In this case, the stability of the aerodynamic system with respect to convective flows that occur above the evaporation surface in analytical studies is not sufficiently substantiated. Such assumptions lead to temperature and structural stratification during the development of the inflow jet, changing its trajectory, which a priori reduces the efficiency of shielding ..

The studied features of the aerodynamic properties of air-jet flows in the horizontal axial interaction with slit effluents have shown that the use of existing design solutions of activated onboard exhausts requires air exchange in large volumes with significant energy costs while not characterized by high sanitation. To solve the problem requires new design developments and methods that are fundamentally different from those used in the peculiarities of the formation of air-jet flows, technical solutions and energy efficiency.

A mathematical model of turbulent momentum, energy and matter transfer in interacting aerodynamic processes of inflow jets with rotating flows with two-level shielded protection against harmful substances over open surfaces of industrial baths has been developed.

Numerical simulations with the construction of vector flows of velocities and temperatures are performed, which show that the most efficient aerodynamic process occurs when using inflow jets with ejection feeding.

Analytical dependences of the characteristic values for the temperature field and the field of water vapor concentrations with numerical solution of the fundamental energy equation in which the effective coefficients of thermal conductivity and diffusion are introduced are determined, and the systems of air flow dynamics equations determine the velocity and pressure fields.

A laboratory model of an industrial bath equipped with a two-level air-jet screen has been developed and constructed. Based on experimental studies, the dependences of the ratio of supply air and exhaust air for the most effective capture of pests. According to the results of experiments, the functional dependences of the efficiency η of two-level air-jet screens on the surface temperature of the liquid t and the geometric dimensions of the screen structure are obtained.

Experimental researches of the offered design of the air-jet screen on the basis of numerical modeling are carried out. It is shown that with increasing the relative height of the sides to the width of the bath, the efficiency of trapping increases. Stabilization and formation of self-regulating rotational flows over the surface of the bath is achieved under conditions of increasing the height of the sides of the bath and the values of the Archimedean numbers $Ar \leq 0,3$.

The reliability of research data is ensured by the use of experimental planning methods, methods of statistical processing of research results and the use of highly effective mathematical methods in the development of research methods. A wide range of changes in air flow rates of shielding jets and suction air flow rates at different geometric ratios of bath board heights, suction slits and bath liquid temperature is obtained.

On the basis of experimental researches efficiency of work of the two-level air-jet screen at various temperatures of a surface of a liquid of a bath (Archimedes' criterion) is defined. Empirical dependences are obtained to determine the flow of supply air and

exhaust air at different ratios of the geometric dimensions of the structure, which allows to perform aerodynamic calculation of air duct networks of local ventilation. A qualitative assessment of the temperature distribution processes in the volume, which is limited by the surface of the liquid and the sides of the bath.

The method of calculation of constructive decisions of elements of the two-level air-jet screen with use of aerodynamic properties of air flat inflow-jet and interacting rotational streams is developed.

The technical and economic comparison of the existing systems of capture and localization of technological hazards and the proposed one is carried out. The economic efficiency of use of the developed devices in comparison with alternative variants is shown, specific indicators of energy efficiency are resulted.

The practical significance of the obtained results. The engineering technique of calculation and acceptance of constructive decisions of elements of the two-level air-jet screen with use of aerodynamic properties of air flat inflow-jet and interacting rotating streams is created.

The device for removal of harmful allocations is developed and protected by the patent of Ukraine.

Recommendations for improving the design and operation of a two-level air-jet screen to increase its energy efficiency and more efficient localization and capture of harmful substances have been developed.

The use of an improved design of a two-level air-jet screen will reduce the amount of hazards coming from the surface of the liquid industrial baths by an average of 4... 6%, which in turn significantly affects the productivity and energy consumption of general ventilation systems of the industrial complex.

Scientific novelty of the work.

For the first time:

- the efficiency of the dynamic relationship of the inflow-jet flow with the rotational flow is substantiated, the physical features of which determine the development of theoretical and experimental research in the direction that will ensure

the maximum possible capture of harmful substances with minimal energy consumption;

- the characteristics of the two-level air-jet screen are obtained, which confirms the adequacy of the developed physical and mathematical model;

- Mathematical and geometrical characteristics of the two-level model of air-jet shielding with the ratios of supply air and suction rotating flow are specified for the most effective capture of hazards.

Further developed:

- scientific substantiation and deepening of the technique of physical and mathematical modeling of the air screen, in which coaxial counter jets with ejection feeding in combination with rotating flows are considered.

Key words: air-jet screens, two-level, rotating streams, industrial baths, large-sized, catching of harmfulness, local ventilation system.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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).
2. 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. Cassootherm 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).
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. Корбут В. П., Рибачов С. Г. Експериментальні дослідження дворівневого повітряно-струминного огороження відкритої поверхні промислових ванн великих розмірів. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Науково-технічний збірник КНУБА, К.:2021 №36, с. 6-14 (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 № U 2021 01120 UA 7 F 24 F 13/06. Пристрій для видалення шкідливих виділень. / Корбут В. П., Скляренко О. М., Рибачов С. Г. // Промислова власність. – 2021. – №3. Кн.34. – С. 3.55 (Особистий внесок здобувача – розробка конструкції дворівневих повітряно-струминних екранів з обертовими потоками).

ЗМІСТ

Умовні позначення та індекси	17
ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРОБОК ЛОКАЛІЗАЦІЇ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН ПОВІТРЯНИМИ ПРИПЛИВНИМИ СТРУМИНАМИ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ З ВІДСМОКТУВАЧЕМ ПРОМИСЛОВИХ ВАНН З ВІДКРИТОЮ ПОВЕРХНЕЮ	24
1.1. Вплив шкідливих газоподібних речовин від гальванічних ванн на повітряне середовище виробничого приміщення	24
1.2. Особливості та дослідження конструктивних рішень активованих систем місцевих відсмоктувачів	26
1.3. Аналіз математичних рівнянь руху повітряних течій та фундаментальних теорій переносу при локалізації шкідливих речовин від гальванічних ємностей	36
1.4. Методи розрахунків вентиляційних систем з активованими бортовими відсмоктувачами	41
1.5. Висновки до розділу	44
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОРІВНЕВОГО ПОВІТРЯНО-СТРУМИНЕВОГО ЕКРАНУ ДЛЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН ПРОМИСЛОВИХ ВАНН	45
2.1. Особливість задачі та обґрунтування математичної моделі повітряно-струминних течій над відкритою поверхнею промислової ванни	46
2.3. Математична модель і метод розрахунку дворівневого повітряно-струминного екрану. Вихідна система основних рівнянь	47
2.4. Чисельний метод рішення рівнянь математичної моделі	69
2.3. Висновки до розділу	76

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОРІВНЕВИХ ПОВІТРЯНО-СТРУМИНЕВИХ ЕКРАНІВ ПРОМИСЛОВИХ ВАНН	77
3.1. Задача досліджень. Експериментальна установка. Методика проведення експерименту. Оцінка похибки експерименту	77
3.2. Аналіз експериментальних досліджень та порівняння з результатами моделювання	97
3.3. Висновки до розділу	110
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ДВОРІВНЕВОГО ПОВІТРЯНО-СТРУМИНЕВОГО ЕКРАНУ	112
4.1. Оптимізація параметрів відсмоктувача за ефективністю	112
4.2. Методика розрахунку дворівневого повітряно-струменевого екрану	114
4.3. Розрахунок економічної ефективності від впровадження повітряно - струменевих екранів	122
4.4. Висновки до розділу	126
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	129
ДОДАТКИ	144

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА ІНДЕКСИ

- c_p – ізобарна теплоємність повітря;
 B – ширина ванни вздовж припливної струмини, м;
 D – коефіцієнт дифузії, м²/с;
 d – вологовміст, кг/кг;
 D_e – еквівалентний діаметр;
 l – характерний розмір, залежить від конструктивного рішення струминного покриття, м;
 Y_i – концентрація i -того компонента суміші;
 μ_i – турбулентна в'язкість;
 b_{in} – висота припливних щілинних отворів, м;
 b_{inj} – висота щілин для підживлення струмин екранування, м;
 b_l – висота витяжних щілин, м;
 X_n – довжині струмини, м;
 g – прискорення вільного падіння, м/с²;
 G_n – витрата, кг/год;
 N – потужність, Вт;
 P – тиск, Па
 R – міжфазова передача імпульсу
 F – площа, м²;
 $x; y$ – відповідно, абсциса й ордината;
 t – температура, °С;
 ΔT – різниця температур поверхні випаровування і повітря в приміщенні;
 U – середньозважена фазова швидкість, м/с;
 ΔP – аеродинамічний опір, Па;
 V – об'єм, м³;
 v – швидкість, м/с;
 α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);

ρ - густина, кг/м³;

η – коефіцієнт ефективності;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).г

ВСТУП

Актуальність теми. Об'єктом досліджень є повітряно-струминні екрани, які широко використовуються для локалізації шкідливих парів від промислових ванн різного призначення. Найчастіше застосовують активовані бортові відсмоктувачі від гальванічних ванн, які працюють по схемі «струмина-відсмоктувач», що конструктивно розташовані на одній осі припливного насадка 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 однобортовими 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.

В роботі запропоновано систему вентиляції з використанням аеродинамічних властивостей повітряних плоских припливно-струминних та взаємодіючих з ними обертових потоків. Застосування обертових потоків потребує забезпечення їх стійкості та створення структурних форм шляхом варіювання співвідношення швидкості припливного і відсмоктувального повітря для максимально можливого вловлювання шкідливих речовин при мінімальних енерговитратах. Наведений принцип системи вентиляції при якому утворюється результуюче поле швидкостей в межах промислової ємності в роботі був прийнятий за базовий.

Виконані дослідження спрямовані на удосконалення і розвиток теорії взаємодії плоского припливно-струминного та обертового повітряного потоку для екранування дзеркала випаровування виробничих ванн.

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

Напрямок роботи відповідає Закону України «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки за напрямком «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці промисловості та агропромислового комплексу», Збереження навколишнього середовища (довкілля) та сталий розвиток», та тісно пов'язані з планами дербюджетної тематики Київського національного університету будівництва і архітектури на замовлення Міністерства освіти і науки України (№ 0116U000843 5 ДБ-2016 від 20. 12. 2017р)

Мета дисертаційної роботи – підвищення ефективності локалізації шкідливих виділень від крупногабаритних ванн із застосуванням нового класу динамічних повітряно-струминних огорожень.

Задачі 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 при оптимальних конструктивних параметрах дворівневої припливно-витяжної системи.

- розробити нові енергоефективні конструктивні рішення для локалізації шкідливих речовин від промислових ванн різного призначення.

- розробити методику розрахунку дворівневої повітряно-струминної течії для відкритої поверхні промислових ємностей.

Об'єкт досліджень – 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 досліджень. 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.

Вірогідність наукових положень, висновків і рекомендацій зумовлена використанням документальних законів переносу маси, енергії і

тепломасообмінних процесів при організації ефективного повітророзподілу в стиснених умовах промислової ванни.

Наукова новизна досліджень:

1. Обґрунтовано необхідність комплексного підходу до визначення ефективності 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.

2. Створено фізико-математичну модель повітряного екрану, в якій розглядаються співвісні зустрічні струмини з ежекційним підживленням у сполученні з обертовими потоками, утворюючи стійке захисне поле при випаровуванні шкідливої рідини з промислової ванни.

3. Запропоновано подальший розвиток вирішення газодинамічної задачі на основі диференційних рівнянь Нав'є-Стокса, що дозволяють визначити поля швидкості, температури і тиску в часі для дворівневої моделі повітряно-струминного екранування промислової ванни.

4. Вперше отримано на експериментальній установці аеродинамічні та теплові характеристики дворівневого повітряно-струминного екрану, що підтверджують адекватність прийнятої фізичної моделі, її математичні та геометричні показники.

5. Вперше уточнено співвідношення припливного повітря та обертового потоку, що відсмоктується, для найбільш ефективного вловлювання шкідливостей.

Практичне значення.

Створено інженерну методика 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 та захищено патентом України пристрій для видалення шкідливих виділень.

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

Застосування вдосконаленої конструкції дворівневого повітряно-струминного екрану дозволить зменшити кількість шкідливостей, що надходять з поверхні рідини промислових ванн в середньому на 4...6 %, що в свою чергу суттєво впливає на продуктивність та енергоспоживання загальнообмінними системами вентиляції промислового комплексу.

Апробація результатів дисертації

Результати досліджень та окремі розділи дисертації доповідалися: 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.

Обсяг дисертації.

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.

РОЗДІЛ І. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРОБОК ЛОКАЛІЗАЦІЇ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН ПОВІТРЯНИМИ ПРИПЛИВНИМИ СТРУМИНАМИ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ З ВІДСМОКТУВАЧЕМ ПРОМИСЛОВИХ ЄМНОСТЕЙ З ВІДКРИТОЮ ПОВЕРХНЕЮ.

1.1 Вплив шкідливих газоподібних речовин від гальванічних ванн на повітряне середовище виробничого приміщення

Технологія гальванічних процесів полягає в нанесенні на поверхню металевих виробів тонких шарів іншого металу за допомогою електричного поля. Гальванічні покриття вважаються [4] одними з найбільш чистих, корозійно та хімічно стійких, а також найбільш економічні по витраті нанесеного металу.

При підготовці поверхні металу (зняття окислів, знежирення і т.д.) до покриття застосовують різні розчини: азотна, сірчана, соляна кислоти, хлористий натрій, їдкий натрій, тринатрійфосфат, сірчаний цинк, сірчаноокисле залізо, ціаністий калій, вуглекислий калій і т.д. При покритті металів застосовують: окис цинку, ціаністий натрій, їдкий натрій, сірчистий натрій, сірчистий цинк, сірчаноокислий алюміній, ціаністий кадмій, сірчаноокислий кадмій, олово сірчаноокисле, ціаниста мідь, сірчана кислота, сірчаноокислий нікель, хлористий нікель, хромовий ангідрид, срібло хлористе, срібло ціанисте, калій ціаністий, хлорне золото, залізистоціаністий калій та ін. Всі ці шкідливі речовини в тих чи інших кількостях виділяються у вигляді газів або парів з ванн в повітря робочої зони приміщення. Концентрація таких випаровування інколи досягає значень в 300 мг/м^3 і вище, що висуває певні вимоги до ефективності місцевих відсмоктувачів.

Канцерогенність речовин впливає на конструкцію і ефективність місцевих відсмоктувачів, що утворюються над поверхнею ванни. Останнє безпосередньо пов'язано з кінетикою хімічної реакції, силою струму, площею поверхні оброблюваних виробів. Аналіз [15] дисперсного складу аерозолів що потрапляє в

цех показав, що середній розмір часток знаходиться в наступних межах: при травленні металу 5-6,5 мкм, при знежирюванні 5-5,5 мкм, при ціанистому цинкуванні 5-8 мкм, і т.д. Таким чином, всі частинки мають приблизно однакові розміри. При швидкості струмини здування активованого відсмоктувача 5-10 м/с, масою частинок нехтують і вважають аерозоль однорідним газовим середовищем.

Особливо шкідливими для працюючих на виробництвах електролізу, як вважав В.В. Батурін [18], є виділення від ванн хромування, оміднення, цинкування та сріблення, а також технологічні процеси, що супроводжуються додаванням ціанистих сполук. Отруйна дія таких парів посилюється при підвищенні температури розчину. Особливо шкідливими є пари хромової кислоти і ціанистого водню, які можуть виділятися при випадковому попаданні невеликої кількості кислоти в лужне середовище електроліту.

При цинкуванні в лужно-ціанистих ваннах, крім ціанистих солей цинку, розчин містить також ціанистий натрій і калій, які можуть привести до гідролізу ціаніду і утворення парів синильної кислоти під впливом вуглекислоти в повітрі. Ціанистий водень одне з найбільш токсичних летючих ціанистих з'єднань, яке може виділятися з лужно-ціанистої ванни. В роботі [4] особливо наголошується, що крім токсичності продуктів летючих виділень від ванн, концентрації розчину і густини струму, показником збільшення шкідливості процесу є температура ванни. За даними [4] температура ванни може досягати 80 °С, а при відгінці сірковуглецю від віскозного джгута 90 °С. Густина газових виділень з поверхні ванни становить до 0,08 г/(с·м²), а при виробництві штучних волокон до 70 г/(с·м²). Концентрація газових потоків над поверхнею спостерігалася до 0,2 г/м³, при виробництві хімічних волокон - до 140 г/м³.

Гідролізні виробництва становлять небезпеку не тільки для повітря, але і для всього навколишнього середовища, включаючи воду, ґрунт і т.д. Висновки в доповіді експертів ООН в червні 2018 р [4] акцентують увагу на постійне забруднення атмосфери, незважаючи на значні витрати в області захисту повітряного середовища. У деяких містах, наприклад Кривий Ріг, Запоріжжя та

деяких інших, концентрації шкідливих речовин в атмосфері перевищують разові максимально допустимі значення в декілька раз. У Маріуполі таке перевищення спостерігається по оксидам азоту, фенолу, бензопірену і деяким іншим речовинам. Навіть при істотному скороченні промислового виробництва більше 40% жителів Маріуполя дихають повітрям з підвищеними концентраціями шкідливих речовин. В значній мірі це пов'язано з тим, що на підприємствах недостатньо приділяється увага на реконструкцію та модернізацію систем вентиляції. Дана робота присвячена вдосконаленню місцевої витяжної вентиляції на одному з найбільш шкідливих виробництв - гальванічному.

1.2 Особливості та дослідження конструктивних рішень активованих систем місцевих відсмоктувачів

Особливостями активованих бортових відсмоктувачів (АБВ) полягає в тому, що процес видалення технологічних шкідливостей активізований припливною струминою. Конструкції АБВ різних типів знаходять широке застосування в гальванічних, травильних виробництвах, технологічних басейнах АЕС де хімічні реакції супроводжуються виділенням токсичного аерозолу (ГДК до 0,006 мг/м³) і конвективної теплоти. Технологічні, санітарно-гігієнічні характеристики джерел шкідливих виділень, геометричні розміри виробів, що підлягають обробці вельми різноманітні, тому конструктивні рішення систем місцевих відсмоктувачів мають широкий спектр (рис 1.1).

Багаточисельні дослідження [10, 11, 15, 24, 25, 30, 44, 57, 61, 74, 77, 82, 84, 96, 97, 99, 106, 112, 116, 118, 126] показали, що однобічні бортові відсмоктувачі доцільно приймати для ванн шириною 500-700 мм при більшій ширині і підвищенні температури поверхні випаровування доцільно приймати двобічні бортові відсмоктувачі. При рівні розчину у ванні від кромки борта 120-130 мм рекомендуються перевернуті відсмоктувачі. Для підвищення ефективності перевернуті відсмоктувачі виконуються з піддувом.

Активуються місцеві бортові відсмоктувачі плоскими або плоско-паралельними припливними струминами, які спрямовані до відсмоктувача, розмежовуючи зону виділення шкідливостей і повітря приміщення. Такі локалізуючі екрани являють собою щільні припливні і всмоктуючі пристрої розміщені найчастіше співвісно по різні боки робочої поверхні технологічного обладнання. В порівнянні з пристроями закритого типу їх ефективність декілька нижче, а витрати припливного і витяжного повітря збільшуються.

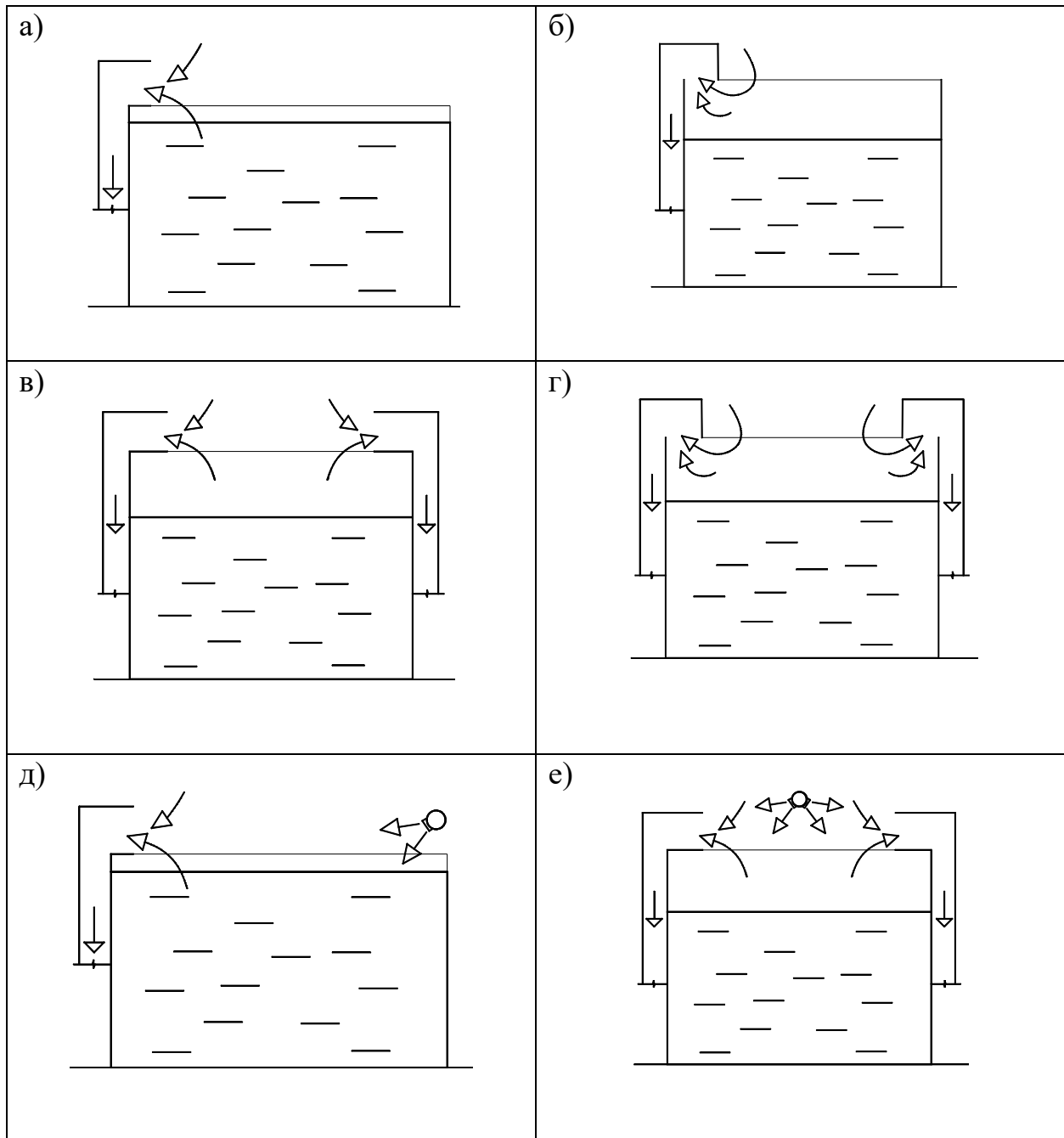


Рис. 1.1 Конструктивні рішення бортових відсмоктувачів

а.) однобортовий відсмоктувач; б) однобортовий опрокинутий відсмоктувач; в) двобортовий відсмоктувач; г) двобортовий опрокинутий відсмоктувач; д) однобортовий відсмоктувач з передувкою; е) двобортовий відсмоктувач з передувкою.

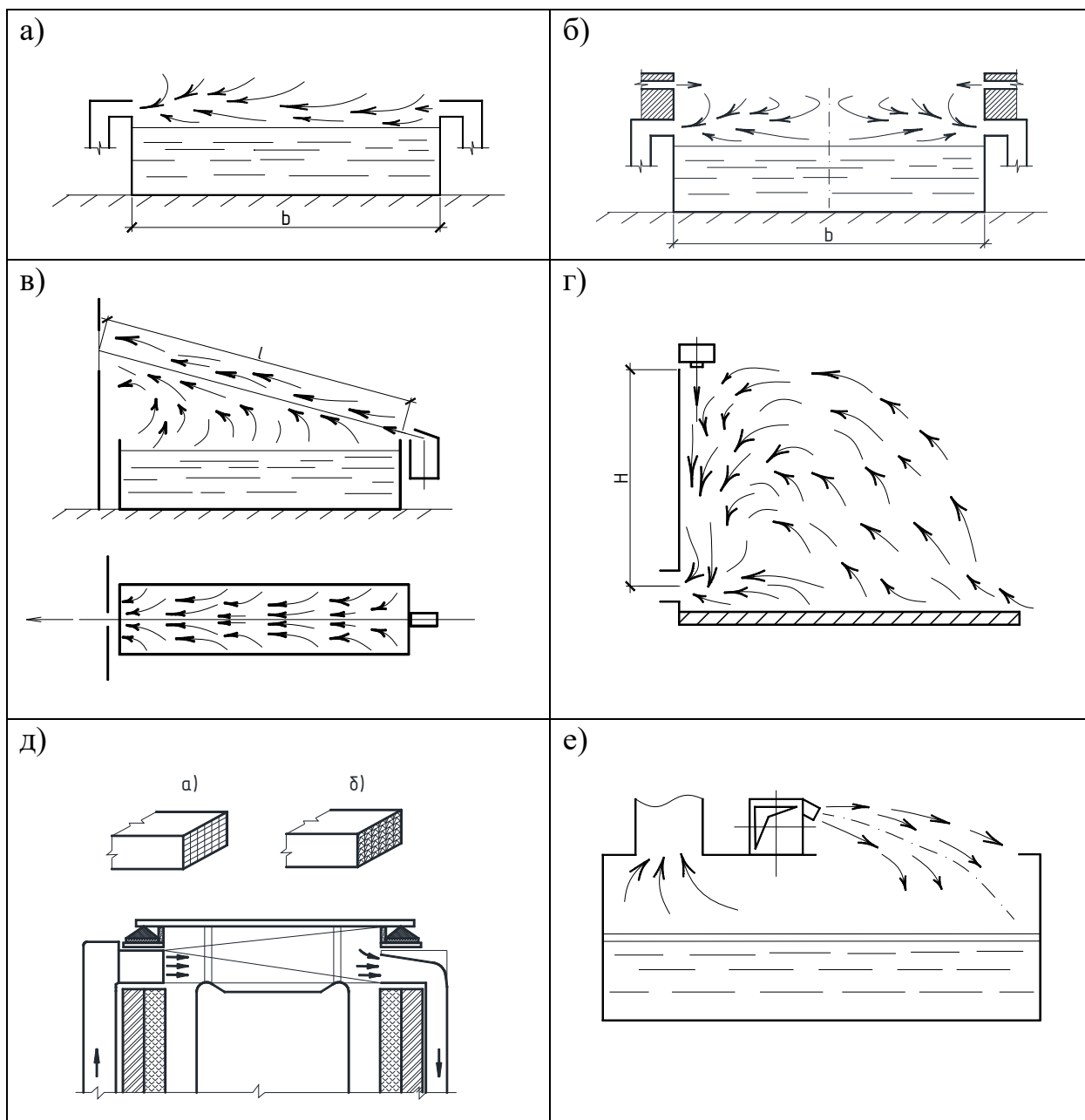


Рис 1.2 Схеми активованих систем відсмоктування підвищеної ефективності.

а) активований відсмоктувач; б) комбінований дворівневий відсмоктувач; в) панельний відсмоктувач зі здуванням компактною струминою; г) панельний відсмоктувач зі щільним піддуванням вздовж панелі; д) активований бортовий відсмоктувач з насадками для формування струмини; е) компенсаційне укриття.

Порівняльний аналіз зроблений автором для гальванічних ванн шириною до 3 м по різних методикам [4-8, 11, 27] показав, що об'єми припливного і видаляемого повітря активованим бортовим відсмоктувачем змінюється від 1:3,5 до 1:14, тобто на 1000 м³ припливного повітря необхідно видалити від 3,5 до 14x10³ м³. Це свідчить про необхідність суттєвого уточнення конструктивних розробок з уточненим науковим обґрунтуванням (докладніше див. розділ IV).

Проте компактність і вільний доступ до робочого простору дозволили АБВ відкритого типу знайти широке застосування в промисловій вентиляції (рис. 1.2).

Виконані дослідження повітряно-струминних огорожень гальванічних ванн показали, що стійкість течії для розповсюджених систем «струмина – відсмоктувач» з врахуванням конвективних потоків, які виникають над відкритою випарною поверхнею, визначається швидкістю на осі струмини в критичному перерізі. Слід зауважити, що припливна струмина в цьому перерізі вже послаблена, а дія відсмоктувача ще не інтенсивна. Тому в цій зоні існує небезпека зони прориву шкідливих речовин в приміщення цеху.

Мінімальну швидкість (v_{min}) по осі системи "струмина-відсмоктувач" в залежності від спрямування висхідного конвективного потоку можна визначити по рівнянню [50]:

$$v_{min} = 5,72 \left(B \frac{\Delta T_n}{T_B} \right)^{0,5} \leq 1,5 \text{ м/с} \quad (1.1)$$

де B – ширина ванни вздовж припливної струмини,

$\Delta T = (T_n - T_B)$ – різниця температур поверхні випаровування і повітря в приміщенні.

Дослідження спрямовані на виявлення параметра v_{min} показали різні результати від 0,5 до 4 м/с. В роботі [89] пропонується підтримувати швидкість 0,5-1 м/с; в [15] 1-1,2 м/с, так як при швидкості 0,5-0,8 м/с відбувається прорив шкідливих речовин в приміщення; в [103] 1-2 м/с; в [126] відповідно до 4 м/с.

У роботах [4, 18, 76] отримані залежності для розрахунку осьової швидкості поблизу всмоктуючої щілини.

Для відривної моделі течії (із зоною завихрення) визначається за формулою:

$$v_x = \frac{2v_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{B}{x} \quad (1.2)$$

Для безвідривної ізопотенційної моделі, швидкість всмоктування в щілині рівномірна і визначається:

$$v_x = \frac{2B}{\pi} \frac{1}{\pi \sqrt{(B^2+x^2)}} \quad (1.3)$$

Для вісесиметричних течій автори [15] пропонують вводити функцію току ψ в рівняння у випадку визначення вектора швидкості в циліндричних координатах r, z

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0 \quad (1.4)$$

В багатьох роботах приведені емпіричні залежності швидкостей всмоктування для щілин та патрубків різної форми, які не мають широкого практичного застосування.

В роботі [22] Баличева) рекомендується припливну струмину подавати з такою швидкістю, щоб вона досягала щілини відсмоктувача. Окрім того, рекомендується повітряну струмину наближати до дзеркала ванни з метою налипання її на поверхню випаровування. Досліджено, що при подачі повітря більше 10-12 м/с на поверхні виникають хвилі, які збільшують виніс крапель розчину із ванни та інтенсифікують тепломасообмінний процес.

Взаємодію співвісно розташованих струмин і відсмоктувача вивчав В. М. Посохін [15]. В залежності від продуктивності відсмоктувача розглядалися три характерних режими взаємодії (рис. 1.3): не повне і повне вловлювання та надлишкове. Автор приходить до висновку, що характер течій, якій притаманні

швидкості, температури, дотичні напруги мають особливості, що полягають в значному поперечному градієнті тиску і відповідному збільшенні складовій швидкості. Тому важко зробити обґрунтовані висновки у вигляді параметрів і профілів повздовжньої швидкості без експериментальних досліджень

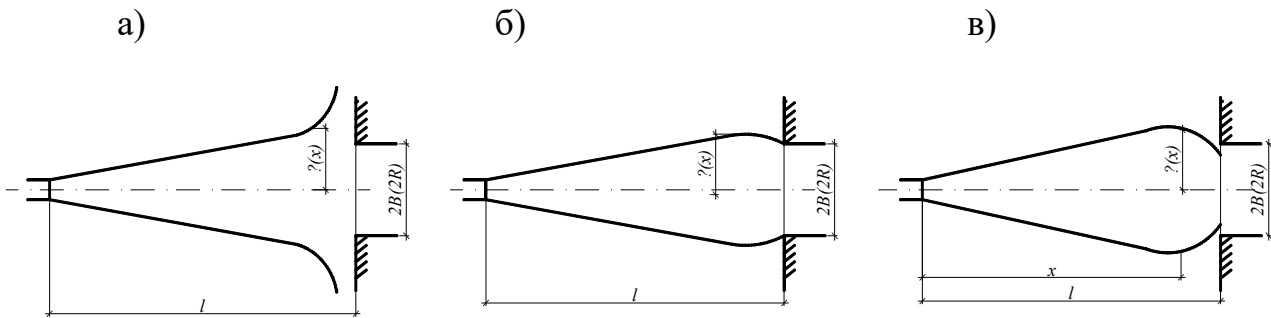


Рис. 1.3 Взаємодія співвісно розташованих струмин і всмоктувача
а) не повне вловлювання; б) повне вловлювання; в) надлишкове.

Слід враховувати і критерій Архімеда Ar дія якого впливає на стійкість системи «струмина-відсмоктувач». Значення Ar визначається у співвідношенні гравітаційних та інерційних сил:

$$Ar = \frac{g \cdot l \cdot \Delta T}{v_{кр}^2 \cdot T} \quad (1.5)$$

де $v_{кр}$ - характерна швидкість, яка визначається з умови неруйнування струминного перекриття над ванною;

l – характерний розмір, залежить від конструктивного рішення струминного перекриття (ширина ванни або відстань від припливного насадка до критичного перерізу струмини);

ΔT – різниця температур нагрітої поверхні розчину і температури навколишнього середовища T , К;

$g = 9,81$ – прискорення вільного падіння, м/с.

Припливні струмини спільно з обертовими потоками та висхідними конвективними потоками визначають характер циркуляції повітря в об'ємі

промислової ванни в якій формуються температурний розподіл, вологість, швидкість і концентрація шкідливих речовин.

Конвективний потік від нагрітої поверхні за розвитком схожий з припливною струминою, яка спрямована вертикально вгору з інтенсивним перемішуванням з навколишнім середовищем (рис. 1.4). Характерні профілі швидкості і температури з найбільшими значеннями спостерігаються на осі з постійним їх зменшенням до границь.

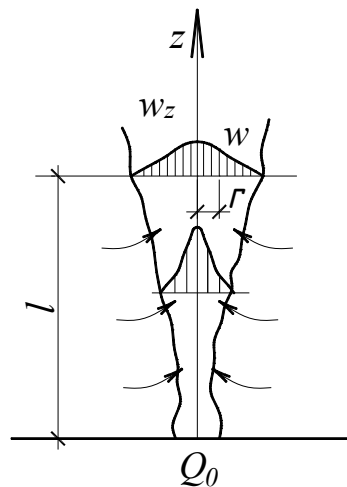


Рис. 1.4 Конвективний потік від нагрітої поверхні

Вплив припливної струмини при перехресній схемі робочих потоків викликає гальмування конвективного потоку і зниження його температури. І тим не менше діюча під'ємна Архімедова сила може збільшити загальний імпульс конвективного потоку та руйнувати захисний повітряний потік.

Особливість всмоктуючого повітряного факела полягає у безвихровій або потенціальній течії, що дає можливість застосовувати залежності теоретичної аеродинаміки і розповсюджувати отримані результати на інші рідини і гази, як ідеальну рідину. При розгляді конкретних конструктивних схем виникають труднощі у знаходженні такої комбінації течії, яка задовольняла би граничним умовам поставленої задачі. Розглянемо моделі щілинних відсмоктувачів, які

поширені для видалення шкідливого повітря від гальванічних і травильних ванн (рис. 1.5).

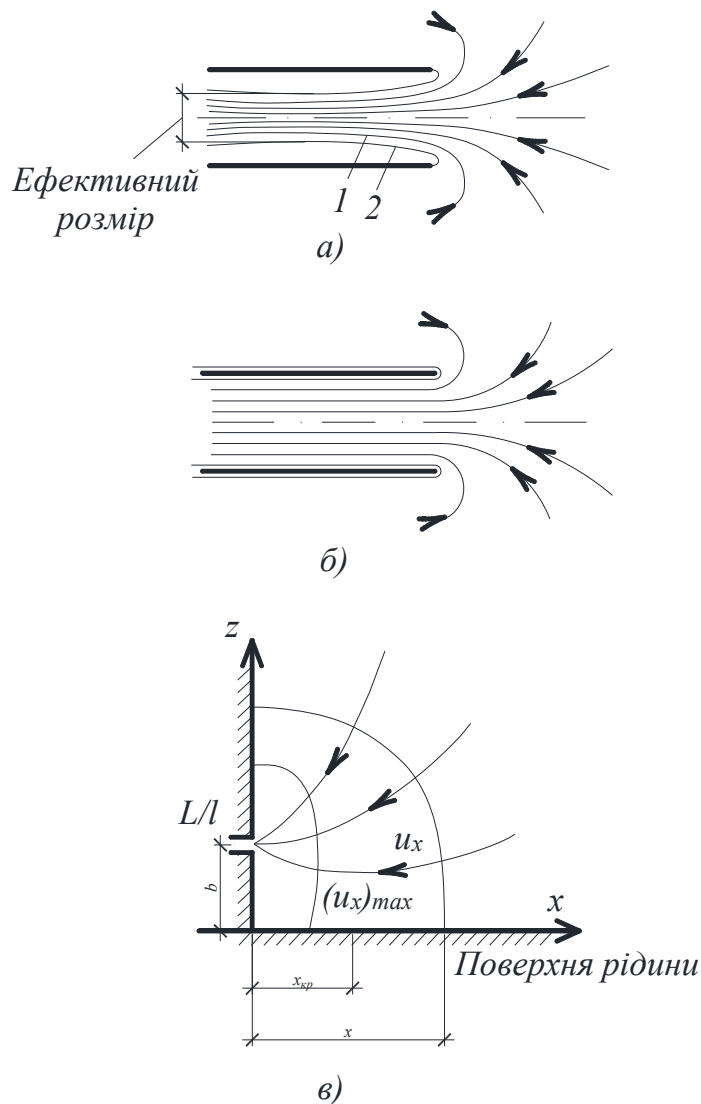


Рис. 1.5 Розрахункові моделі течії.

а) відривна; б) безвідривна. в) взаємодія напівобмеженого лінійного потоку повітря з рідинною площиною.
1 - вільна лінія стоку 2 - зона завихрення

Біля всмоктуючої щілини потенціальна течія порушується (рис. 1. 5а), утворюючи турбулентну зону, що ускладнює процеси моделювання. Для спрощення розрахункових залежностей турбулентну зону умовно виключають, оскільки її границі чітко не визначені, а рішення суттєво ускладняється. Задача

спрощується якщо вважати, що течія безвідривна в області обмеженої твердими стінками і вплив міжфазних внутрішніх деформацій відсутній (рис. 1. 5б). Наведені припущення дозволяють визначити форму течії при розрахунках поля швидкості застосовуючи, наприклад рівняння Лапласа або А. І. Шепелева (рис. 1.5.в)

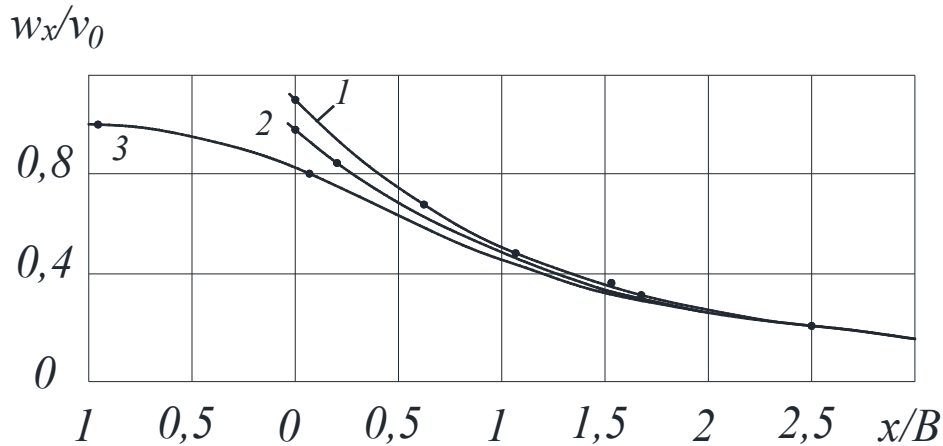


Рис. 1.6. Зміна осьової швидкості поблизу щілинних відсмоктувачів в стінці: 1 відривна течія; 2, 3 – безвідривні течії [50]

Значення швидкості в роботі [128] визначається:

$$\text{по осі } u_x = \frac{L_{1x}}{\pi \cdot l (x^2 + b^2)} \quad (1.6)$$

$$\text{по осі } w_z = \frac{L_{1z}}{\pi \cdot l (z^2 + b^2)} \quad (1.7)$$

де $\frac{L}{l}$ питома секундна витрата повітря.

Зміна осьової швидкості поблизу відсмоктувача в стінці наведені на рис. 1.6. Результати теоретичних кривих наближаються до експериментальних даних, позначеними точками.

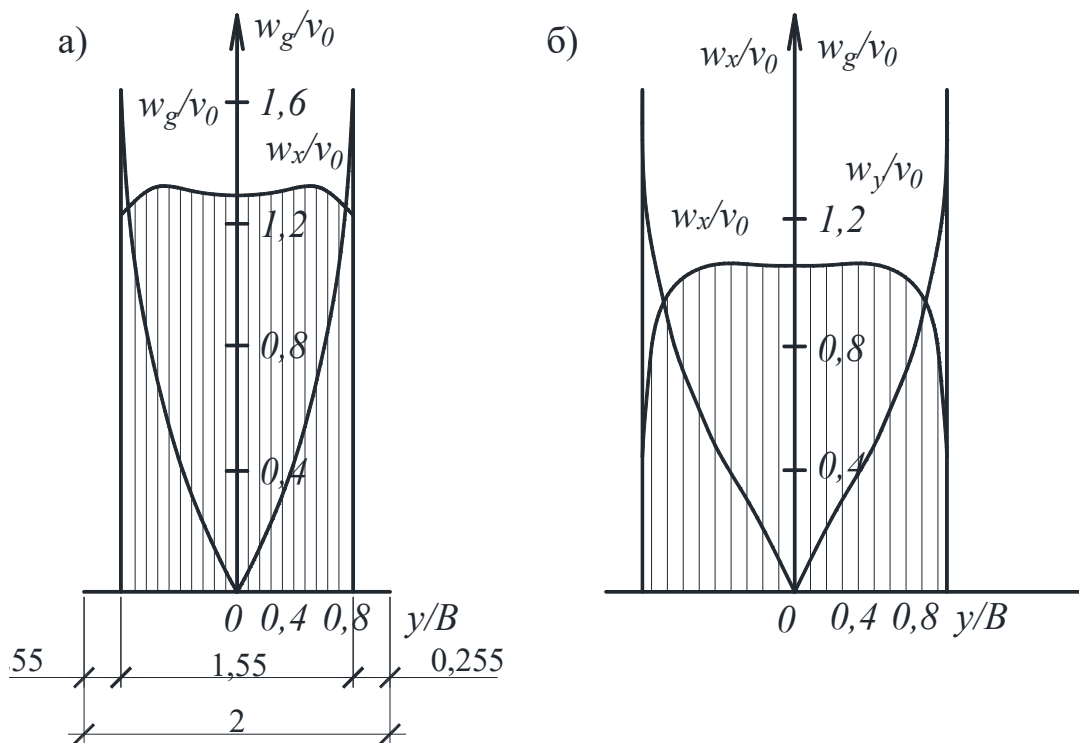


Рис. 1.7. Розподіл швидкості на зрізі щілини:

а – вільно розташована щілина з відривною течією;

б) щілина в стінці з відривною течією.

Особливістю розподілу швидкості в площині щілини для відривної моделі течії (рис. 1.7 б) полягає в тому, що в просторі щілини утворюється вихор, який займає 0,225 ширини щілини. Це означає, що тільки 0,775 її площини ефективно працює на всмоктування.

Виконаний аналіз течій поблизу стоків може бути використаний для приблизних кількісних оцінок відсмоктувачів з кінцевими розмірами.

1.3 Аналіз математичних рівнянь руху повітряних течій та фундаментальних теорій переносу при локалізації шкідливих речовин від гальванічних ємностей

В теоретичних дослідженнях найчастіше використовуються математичні моделі в яких розглядаються системи диференціальних та інтегральних рівнянь, що відображають закони фізики з граничними і початковими умовами

сполученими з конкретними інженерними проблемами. Складні аеродинамічні, тепломасообмінні і дифузійні процеси, що характерні в ємностях гальванічного виробництва являють собою сукупність взаємодіючих течій різної природи і фізико-хімічними властивостями. При таких процесах рух повітряного середовища моделюють з використанням рівнянь нерозривності і компонентів текучого середовища та емпіричних залежностей в'язкості від температури.

Розглянемо головні концептуальні рівняння, що використовуються при аналізі вихрового руху та масопереносу в багатокомпонентному середовищі при математичному моделюванні.

Рівняння нерозривності, що виражає закон кількості руху наведено у вигляді [129]:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1.8)$$

Компоненти вихрового руху w описується рівняннями:

$$\begin{aligned} w_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_z}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) \\ w_y &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) \\ w_z &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (1.9)$$

де V_x, V_y, V_z – складові вектора швидкості.

Викладені співвідношення необхідні для визначення потенціалу швидкості через диференціальну функцію φ

$$\partial\varphi = V_x dx + V_y dy + V_z dz = \frac{\partial\varphi}{\partial x} dx + \frac{\partial\varphi}{\partial y} dy + \frac{\partial\varphi}{\partial z} dz \quad (1.10)$$

При сталій течії потенціал φ є складовою вектора швидкості у співвідношеннях:

$$V_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad V_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad V_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (1.11)$$

Після перетворень залежність (1.8) задовольняє рівнянню Лапласа

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1.12)$$

яке при заданих граничних умовах з рівняння (1.5) можна визначити поля швидкостей в потоках навколо стоків.

Для плоскої течії поле швидкості залежить від двох координат x та y . Тоді рівняння Лапласа приймає вигляд:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (1.13)$$

При аналізі плоских течій в роботах [1-4, 15, 19, 105] використовується функція (ψ), що як і потенціальна швидкість (φ) задовільняє рівняння (1.10)

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (1.14)$$

Потенціальна складова вектору швидкості визначається зі співвідношення:

$$V_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad V_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (1.15)$$

Аналізуючи рівняння (1.10) та (1.15) слідує, що потенціал швидкості і функція току задовільняють умовам Коши-Римана:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (1.16)$$

i визначається як комплексний потенціал

$$W = W(z) = \varphi + i\psi \quad (1.17)$$

що встановлює зв'язок вектора швидкості з областю реальної течії.

При вирішенні рівняння Лапласа існує декілька підходів знаходження швидкісних полів навколо стоку.

Перший – коли розглядається безвідривна течія, при якій граничні умови для рівняння Лапласа, задаються у вигляді розповсюдження швидкості, або значення потенціалу швидкості. При такій постановці задачі отримуються недостовірні результати, так як у рівнянні (1.15) припускається, що швидкість безкінечна або дорівнює нулю. В реальних умовах лінії току мають зону злому.

В другому тлумаченні передбачається наявність вільних поверхонь [129, 130], що виділяють потенціальну течію від вихрових зон, в яких підтримується постійний тиск. Припущення існуючих вільних поверхонь вельми умовне, оскільки не враховується ефект турбулентності. Тому розрахункова границя вихрової зони буде відрізнятися від фактичної тому що у всмоктуючої моделі найчастіше існує відривна зона.

При математичному моделюванні турбулентних течій найчастіше використовується рівняння Нав'є-Стокса з усередненням за критерієм Рейнольдса. В результаті з'являється додаткова величина – напруга тензора в'язкості.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho V_k) = 0 \quad (1.18)$$

$$\frac{\partial (\rho V_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho V_i V_k) - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[(\mu + \mu_i) \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_k} + \frac{\partial V_k}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i \quad (1.19)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_k} ((\rho E + P)V_k + q_i - \tau_{ik}V_i) = S_{ik}V_k \quad (1.20)$$

де t – час; V_i – швидкість; ρ – густина; P – тиск текучого середовища; τ_{ik} – тензор в'язких напружень зсуву; X_i – координата руху в просторі; S_i – зовнішні масові сили, що діють на одиничну масу текучого середовища; E – повна енергія одиничної маси текучого середовища; q_i – дифузійний потік (індекси позначають сумування по координатним напрямкам).

В межах $k - \varepsilon$ моделі [129, 130] для замкнення цієї системи рівнянь використовуються складові кінетичної енергії турбулентності та її дисипації.

Турбулентна енергія k та енергія дисипації ε визначаються із рівнянь руху:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_k} (\rho V_k k) = \frac{\partial}{\partial X_k} \left(\left(\mu_i + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial X_k} \right) + S_k \quad (1.21)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_k} (\rho V_k \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial X_k} \left(\left(\mu_i + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_k} \right) + S_\varepsilon \quad (1.22)$$

Турбулентну в'язкість μ_i можна виразити через кінетичну енергію k і дисипацію цієї енергії ε :

$$\mu_i = f_\mu \frac{c_\mu \rho K^2}{\varepsilon} \quad (1.23)$$

де: f_μ – функція, за допомогою якої моделюється перехід з ламінарної течії в турбулентну і навпаки; $c_\mu = 0,09$

При гальванічному виробництві суміш, що випаровується має різні складові. По своїм фізико-хімічним властивостям відрізняється від повітря, тому необхідно враховувати зміни концентрацій в просторі внаслідок процесів дифузії. Ці процеси моделюються наступним рівнянням:

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_k} (\rho U_k Y_i) = \frac{\partial}{\partial X_k} \left((D_{ij} + D'_{ij}) \frac{\partial Y_i}{\partial X_k} \right) \quad (1.24)$$

де Y_i – концентрація i -того компонента суміші;

D_{ij} , D'_{ij} - коефіцієнти молекулярної і турбулентної дифузії, що підкорюються закон Фіка.

Наведено системи, що складається з рівнянь Нав'є-Стокса, Лапласа та $k - \epsilon$ моделі турбулентності, є складною системою, яка важко вирішується, а з врахуванням граничних умов і важко моделюється.

Існуючі розрахункові методи не спроможні дати жодного коректного рішення без припущень.

1.4 Методи розрахунків вентиляційних систем з активованими бортовими відсмоктувачами

На базі теорії ідеальної нестисненої рідини ґрунтуються розрахунки повітряних течій поблизу бортових відсмоктувачів. Серед багатьох існуючих методів розрахунку проаналізуємо ті, які найчастіше застосовуються при моделюванні.

Метод накладання потоків [127...134] використовується для визначення поля швидкостей поблизу стоків. Суть метода полягає у вирішенні рівняння Лапласа відносно потенціалу швидкості. Швидкість розглядається як сукупність простих течій, що утворюються точковими лінійними стоками і описуються залежностями:

для точкового

$$\varphi = \frac{L}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}}; \quad \psi = \frac{L}{2\pi} \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \quad (1.25)$$

лінійного

$$\varphi = -\frac{L}{\pi} \ln \sqrt{x^2 + y^2}; \quad \psi = -\frac{L}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{y}{x}, \quad (1.26)$$

де φ, ψ – потенціал і функція стока течії;

L – інтенсивність всмоктування;

x, y, z – координатні точки.

Підсумовуючи окремі течії, визначається поле швидкості для різних геометричних отворів.

Методом накладання потоків окрім поля швидкості вирішуються також оптимальні форми отворів всмоктування вбудованих в плоску непроникну поверхню.

Метод граничних інтегральних рівнянь (ГІР) [136, 137, 138] є удосконаленим методом накладання, що дозволяє визначити інтенсивність джерел і стоків потенційних течій використовуючи залежність:

$$\varphi = \frac{L}{4\pi} \int_D q(v) \frac{dF_v}{r} = -\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^{\infty} q(v_i) \frac{\delta F_i}{r}, \quad (1.27)$$

де $q(v) = \lim \frac{\Delta Q}{\Delta F}$; ΔQ – витрата джерела і стоків, розподілених по площині ΔF ; r – відстань від точки до елемента поверхні δF_i .

Після цього застосовується метод накладання потоків.

Методом ГІР вирішуються двомірні і просторові задачі потенційною течією, а також плоскі течії в'язкої нестисливої рідини [139].

В роботах іноземних авторів [140, 141, 142] для розрахунку швидкісних полів перед відсмоктувачами також використовується метод ГІР разом з методом накладання потоків.

Методи електромагнітної і вихрової аналогії (ЕМА) характерні тим, що поля швидкості потенційних течій ототожнюються з полем іншого фізичного

походження, наприклад електростатичним. Методи ЕМА як і метод вихрової аналогії спрямовані на вирішення рівняння Біо-Савара [143,144]

$$dB = \frac{\mu I}{4\pi r^2} \sin\alpha dl, \quad (1.28)$$

де B – сила, що діє на магнітний полюс струминного провідника, яка пропорційна силі струму I , синусу кута між елементом провідника dl і радіуса r .

Методами аналогії пропонується розраховувати швидкості руху повітря, як на осі так і по всій області течії.

Метод комфорних перетворень, суть якого полягає у розгляді складної області реальних течій [44...47]. Цей метод використовується при розрахунках безвідривних течій на вході до щілинних каналів всмоктування, розташованих в плоскій стінці в необмеженому просторі, а також відсмоктувачів-розтрубів. В останньому випадку визначалася залежність осьової швидкості повітря поблизу відсмоктування-розтруба від кута розкриття і довжини розтруба. В роботах [43-44] вирішувалися задачі повітрообміну в приміщеннях.

Розвиток теорії плоских течій поблизу всмоктуючих отворів належить В.М. Талієву, В. М. Посохіну, І. Л. Гуревічу які застосовували метод комфорних перетворень для розрахунку швидкісних полів біля щілиноподібних отворів з врахуванням утворених відривних зон. При цьому використовувалися змінні функції Кіргофа, Леві –Чівіта, Жуковського та інших. Аналіз описаного методу дозволяє вирішувати двомірні течії при простих граничних умовах. Основною проблемою є знаходження параметрів, що входять в змінну функцію. Для однозначного вирішення вводяться припущення, що дозволяють визначити невідомі параметри.

Виконаний аналіз наведених методів показує, що в рішеннях найчастіше припускалися наступні припущення: зрив потоку з гострих кромek щілинних отворів не враховувався; поверхня всмоктування приймалась ізопотенціальною;

швидкість на вільних границях, що виділяє вихрову зону від потенційної течії, приймалась, як *const*.

1.5 Висновки до розділу

1. На основі аналізу виконаних досліджень обґрунтовано актуальність застосування динамічного повітряно-струминного принципу екранування промислових ванн для відокремлення джерела шкідливих виділень від повітряного середовища приміщення.

2. В основу теоретичних розрахунків активованих відсмоктувачів покладені взаємодія плоских струмин і щілинних стоків, розташованих на одній осі, використовуючи найчастіше метод накладання потоків. При цьому стійкість аеродинамічної системи відносно конвективних потоків, які виникають над поверхнею випаровування в аналітичних дослідженнях не достатньо обґрунтовані. Такі припущення призводять до температурного і структурного розшарування при розвитку припливної струмини, змінюючи її траєкторію, що априорі знижує ефективність екранування.

3. Вивчені особливості аеродинамічних властивостей повітряно-струминних течій у горизонтальній осьовій взаємодії зі щілинними стоками показали, що використання існуючих конструктивних рішень активованих бортових відсмоктувачів потребують повітрообмін у великих об'ємах зі значними витратами енергоресурсів при цьому характеризуються не високими санітарно-гігієнічними показниками. Для вирішення проблемної задачі необхідні нові конструктивні розробки і методи які за особливостями формування повітряно-струминних течій, технічними рішеннями і енергетичній ефективності принципово відрізняються від тих, що використовуються.

РОЗДІЛ II. ТЕОРЕТИЧНІ РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОРІВНЕВОГО ПОВІТРЯНО-СТРУМИНЕВОГО ЕКРАНУ ДЛЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН ПРОМИСЛВИХ ВАНН

Механізм турбулентного переносу імпульсу, енергії і речовини у взаємодіючих аеродинамічних процесах припливних струмин з обертовими потоками при екранованому захисті від шкідливих речовин залишається на стадії вирішення. Не існує єдиного погляду, в основу якого покладені розрахункові методи складних процесів повітряно-струминних течій. В переважній кількості існуючих методик не враховується або недостатньо обґрунтовується:

- тепломасоперенос від теплових джерел зі шкідливими компонентами;
- реальна картина течії поблизу отворів всмоктування, як правило, спрощується, замінюючи точковим або лінійним стоком;
- утворення вихрових зон, що впливають на швидкісні поля, особливо поблизу стоків;
- вибір геометричних співвідношень аеродинамічної системи повітрообмінних течій повинен забезпечувати стійку безвихрову течію відносно відкритої поверхні джерела шкідливої технологічної рідини.

В даному розділі виконані теоретичні дослідження локалізації 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.

2.1 Особливість задачі та обґрунтування математичної моделі повітряно-струминних течій над відкритою поверхнею промислової ванни.

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.

Проаналізовані теоретичні дослідження багаточисельних різноманітних турбулентних течій показали, що головною проблемою при розрахунках є незамкнутість систем рівнянь. Класичні системи замикання Л. Прандтля, Дж. Тейлора, Т. Кармана не можливо використати через недостатність їх інформативності відносно турбулентних характеристик. Необхідні дані про кінетичну енергію турбулентності, її масштабність можуть бути отримані через складні моделі, які поділяються на дві групи [61, 74, 97]:

1. Моделі типу Невзглядова-Драйдена (НД), що виходять із пропорційності дотичного напруження кінетичної енергії;

2. Моделі типу Прандтля-Колмогорова (ПК), де приймається градієнтна форма визначення напруги тертям. Концепції моделей ПК покладено в основу $k - \varepsilon$ моделей турбулентності, що отримали широке розповсюдження при аналізі течій в різних межах чисел Рейнольдса. В $k - \varepsilon$ моделях використовують додаткові рівняння переносу кінетичної енергії турбулентності k та швидкість дифузії газових молекул в повітрі ε .

Перевага моделі (ПК) в порівнянні з (НД) полягає в тому, що в ній в явному вигляді входить в'язкість, тому при чисельному методі вирішення системи рівнянь має аналогію з методами вирішення рівняння Нав'є-Стокса.

2.2 Математична модель і метод розрахунку дворівневого повітряно-струминного екрану. Вихідна система основних рівнянь

Виконаний аналіз місцевих відсмоктувачів різних типів показав, що традиційні способи і конструкції для вловлювання шкідливостей недостатньо ефективні. Підвищення швидкості припливної активної струмини особливо для ванн зі значними розмірами, викликають хвилеутворення на відкритій рідинній поверхні і підвищують тепломасообмін від гальванічного розчину з навколишнім середовищем. Це сприяє переносу шкідливостей в приміщення.

З метою підвищення ефективності роботи місцевого відсмоктувача та зниження переносу шкідливостей від відкритої поверхні до повітря приміщення розроблена конструкція дворівневого місцевого відсмоктувача, що показана на Рис.2.1. По двох протилежних бортам ванн встановлені витяжні бортові відсмоктувачі 1. Над ними знаходиться припливні патрубки 2. Припливна струмина має досягнути середини ванни і повернутися, накластися на поверхню рідини і перейти до витяжного отвору. Поставлена задача досягається тим, що по всій довжині нижньої частини припливного патрубка 2, яка сполучена з ежекційною щілиною для підсмоктування повітря 3 з робочої зони приміщення, утворюється захисний примежовий шар активної екрануючої струмини від руйнування гравітаційними силами. Утворена припливна струмина має підвищену стійкість і далекобійність та суцільну циркуляційну обертову зону під дією відсмоктувача, що утворює дворівневе перекриття виділених шкідливих речовин. При цьому буде існувати подвійне перекриття поверхні токсичної рідини – зворотнім потоком і плоскою припливною струминою. Швидкість руху повітря в зворотному потоці буде меншою, чим в традиційній схемі однобортового відсмоктувача, активованим припливною струминою. Витрата припливного і витяжного повітря мають бути знайдені так, щоб струмина досягла середини ванни і повернулась в зворотному напрямі.

Швидкість в зворотному потоці не має перевищувати 10 м/с , щоб не викликати утворення хвиль на поверхні рідини.

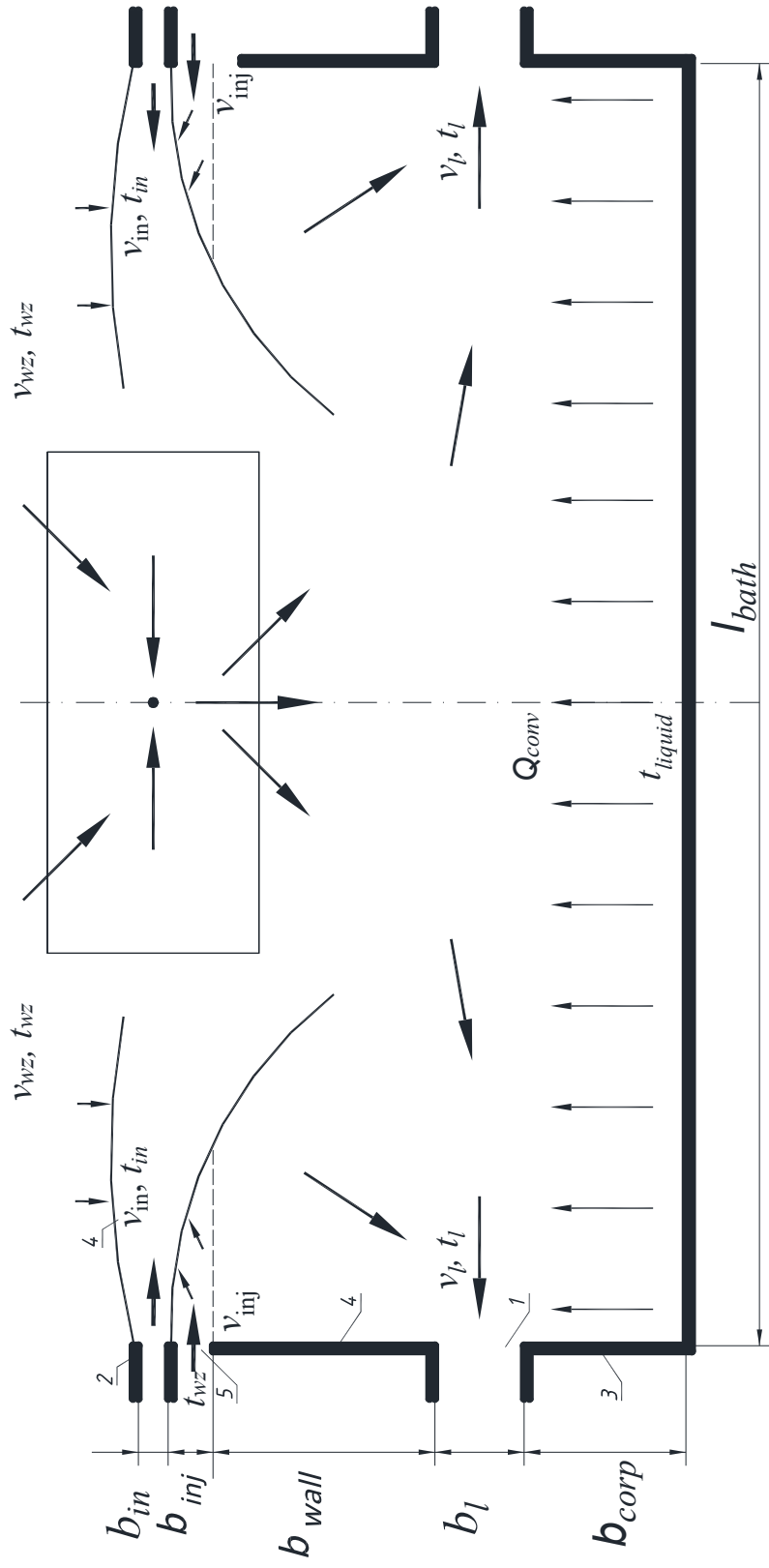


Рис. 2.1. Схема дворівневого повітряно-струминного екрану

1 – щілина всмоктування; 2 – припливна щілина; 3 – ванна з рідиною; 4 – припливна екрануюча струмина

Розглянемо метод розрахунку течії повітря і тепломасообміну над ванної в умовах роботи системи струменевого захисту від виходу шкідливих речовин.

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

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + \nu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + \nu_t) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + g\beta(T - T_0) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + \nu_t) \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + \nu_t) \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(a + \frac{\nu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(a + \frac{\nu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial t}{\partial y} \right] \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial \tau} + u \frac{\partial \rho_v}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(D + \frac{\nu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(D + \frac{\nu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial \rho_v}{\partial y} \right] \quad (2.5)$$

де τ - час, с; x - вертикальна координата, м; y - горизонтальна координата, м; u - вертикальна швидкість, м/с; v - горизонтальна швидкість, м/с; p - надлишковий тиск, Па; t - температура, °С; ρ - густина повітря, кг/м³; ρ_v - парціальна густина (концентрація) водяної пари в повітрі, кг/м³; $g=9,81$ м/с² - прискорення сили тяжіння; ν кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с; ν_t - коефіцієнт турбулентної в'язкості, м²/с; a - коефіцієнт теплопровідності, м²/с; D - коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі, м²/с; σ_t - турбулентне число Прандтля; σ_c - турбулентне число Шмідта.

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

$$\frac{\partial k}{\partial \tau} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \nu_t S^2 - \varepsilon \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_t S^2 - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.7)$$

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 - ε моделлю коефіцієнт турбулентної в'язкості ν_t розраховується за виразом

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (2.8)$$

Коефіцієнти, що входять в рівняння (2.4)-(2.8), дорівнюють:

$$C_\mu = 0,09; \quad C_1 = 1,44; \quad C_2 = 1,92; \quad \sigma_t = 1; \quad \sigma_k = 1; \quad \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

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_w , °C - задана температура поверхні ванни; $p_{sut}(t_w)$, Па - тиск насиченої водяної пари при температурі t_w ; 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

Система рівнянь (2.1) - (2.7) розв'язується методом скінчених рівниць. Для цього будується розрахункова сітка, вузли якої зв'язуються з дискретними значеннями швидкості, тиску і температури. Ці дискретні значення називаються сіточними функціями, які . Фрагмент розрахункової сітки наведено на рис. 2.4

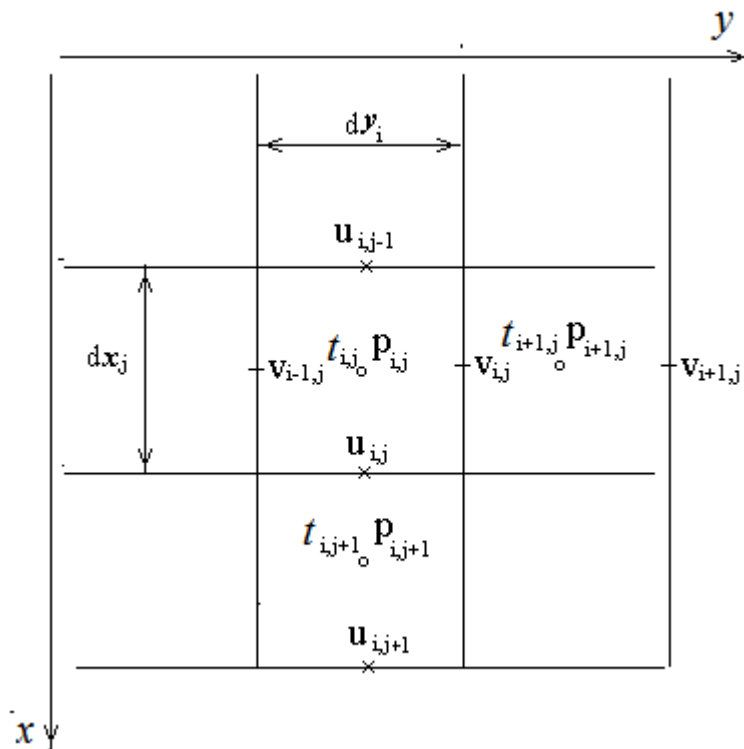


Рис. 2.4. Фрагмент рознесеної розрахункової сітки

Як видно з цього рисунку, сітка розділяє розрахункову область на окремі елементи, в межах яких виконується апроксимація диференціальних рівнянь скінчено-різницевиими рівняннями. В центрі елемента знаходиться вузол, з яким зв'язується сіточна функція тиску $p_{i,j}$. На середині правої грані елемента знаходиться точка, з якою зв'язується сіточна функція горизонтальної швидкості

$u_{i,j}$, а на середині верхньої грані - точка, с якою зв'язується функція вертикальної швидкості $v_{i,j}$. На середині лівої грані буде, відповідно, точка, що відповідає сіточній функції $u_{i,j-1}$, а точка на середині нижньої грані – функції $v_{i-1,j}$. Перший індекс у сіточних функцій відповідає номеру елемента по вертикалі, а другий індекс – його номеру по горизонталі. Скалярні сіточні функції T_{ij} , k_{ij} , ε_{ij} и $v_{i,j}$, також як і $p_{i,j}$, зв'язується с центральною точкою розрахункового елемента, що відображено на рис. 2.4. Оскільки сіточні функції складових швидкостей і тиску зв'язуються з різними вузлами сітки, така сітка називається рознесеною. З використанням рознесеної сітки складаються дискретні аналоги рівнянь системи (2.1)-(2.7). Дискретні аналоги рівнянь (2.1)-(2.3) мають вигляд:

$$\frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{dx_j} + \frac{v_{i,j} - v_{i-1,j}}{dy_i} = 0; \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} & \frac{u_{i,j} - u_{i,j}^*}{d\tau} + u_{i,j}^* \left(c_{xx} \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{dx_{j+1}} + (1 - c_{xx}) \frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{dx_j} \right) + \\ & + v_{i-1/2,j+1/2}^* \left(c_{xy} \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{dy_{i+1/2}} + (1 - c_{xy}) \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{dy_{i-1/2}} \right) = \\ & = \frac{p_{i,j} - p_{i,j+1}}{\rho dx_{j+1/2}} + 2v_{e,i,j+1}^* \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{dx_{j+1} dx_{j+1/2}} - 2v_{e,i,j}^* \frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{dx_j dx_{j+1/2}} \\ & + v_{e,i+1/2,j+1/2}^* \left(\frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{dy_{i+1/2} dy_i} + \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{dx_{j+1/2} dy_i} \right) - \\ & - v_{e,i-1/2,j+1/2}^* \left(\frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{dy_{i-1/2} dy_i} + \frac{v_{i-1,j+1} - v_{i-1,j}}{dx_{j+1/2} dy_i} \right) - g\beta(T_{i,j+1/2}^* - T_0); \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{v_{i,j} - v_{i,j}^*}{d\tau} + u_{i+1/2,j-1/2}^* \left(c_{yx} \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{dx_{j+1/2}} + (1 - c_{yx}) \frac{v_{i,j} - v_{i,j-1}}{dx_{j-1/2}} \right) + \\ & + v_{i,j}^* \left(c_{yy} \frac{v_{i+1,j} - v_{i,j}}{dy_{j+1}} + (1 - c_{yy}) \frac{v_{i,j} - v_{i-1,j}}{dy_j} \right) = \frac{p_{i,j} - p_{i+1,j}}{\rho dy_{i+1/2}} + \\ & + v_{e,i+1/2,j+1/2}^* \left(\frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{dx_{j+1/2} dx_j} + \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{dy_{i+1/2} dx_j} \right) - \\ & - v_{e,i+1/2,j-1/2}^* \left(\frac{v_{i,j} - v_{i,j-1}}{dx_{j-1/2} dx_j} + \frac{u_{i+1,j-1} - u_{i,j-1}}{dy_{i+1/2} dx_j} \right) + \end{aligned}$$

$$2v_{e^*i+1,j} \frac{v_{i+1,j} - v_{i,j}}{dy_{i+1} dy_{i+1/2}} - 2v_{^*i,j} \frac{v_{i,j} - v_{i-1,j}}{dy_i dy_{i+1/2}}. \quad (2.11)$$

де $v_{e^*i,j} = v + C_\mu \frac{k_{i,j}^{*2}}{\varepsilon_{i,j}^*}$ ефективний коефіцієнт в'язкості; dy_i ; dx_j - довжини кроків сітки в напрямках осей OY та OX відповідно.

Система різницевих рівнянь (2.9)-(2.11), складена за неявною різницевою схемою. Згідно цієї схеми апроксимація частинних похідних виконується з використанням сіточних функцій, що відносяться до поточного часового кроку. Величини, що позначені індексом (*), відносяться до попереднього часового кроку, або до попередньої ітерації. Шляхом застосування ітерації їх значення уточнюються в процесі обчислень. Дробні індекси, що містяться у деяких величин, означають, що ця величина відноситься до проміжку між вузлами і розраховується як середньоарифметичне сіточних функцій, що містяться у вузлах. Наприклад, ефективний коефіцієнт в'язкості $v_{e^*i+1/2,j-1/2}$ розраховується за формулою:

$$v_{e^*i+1/2,j-1/2} = (v_{e^*i,j} + v_{e^*i+1,j} + v_{e^*i,j-1} + v_{e^*i+1,j-1})/4$$

Перші похідні, що містяться в рівняннях (2.2) та (2.3), апроксимуються за протипоточною схемою. Згідно з цією схемою, коефіцієнти c_{xx} ; c_{xy} ; c_{yx} ; c_{yy} , що входять до рівнянь (2.10), (2.11), визначаються зі співвідношень:

$$\begin{aligned} u_{^*i,j} \geq 0 : c_{xx} &= 0; u_{^*i,j} < 0 : c_{xx} = 1; \\ v_{^*i-1/2,j+1/2} \geq 0 : c_{xy} &= 0; v_{^*i-1/2,j+1/2} < 0 : c_{xy} = 1; \\ u_{^*i+1/2,j-1/2} \geq 0 : c_{yx} &= 0; u_{^*i+1/2,j-1/2} < 0 : c_{yx} = 1; \\ v_{^*i,j} \geq 0 : c_{yy} &= 0; v_{^*i,j} < 0 : c_{yy} = 1. \end{aligned}$$

Система рівнянь (2.9)-(2.11) після розкриття дужок перетворюється до вигляду:

$$k^U u_{ij} - k^U u_{i,j-1} + k^V v_{ij} - k^V v_{i-1,j} = f^P; \quad (1 \leq i \leq M; 1 \leq j \leq N) \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned}
& a^U u_{i+1,j} + b_3^U u_{i,j+1} + b_2^U u_{i,j} + b_1^U u_{i,j-1} + c^U u_{i-1,j} + d_1^U p_{i,j+1} + d_2^U p_{i,j} + q_2^U v_{i,j+1} \\
& + q_1^U v_{i,j} + r_2^U v_{i-1,j+1} + r_1^U v_{i-1,j} = f^U; \\
& (1 \leq i \leq M; 1 \leq j \leq N - 1)
\end{aligned} \tag{2.13}$$

$$\begin{aligned}
& a^V v_{i+1,j} + b_3^V v_{i,j+1} + b_2^V v_{i,j} + b_1^V v_{i,j-1} + c^V v_{i-1,j} + d_1^V p_{i,j} + d_2^V p_{i+1,j} + \\
& q_2^V u_{i+1,j} + q_1^V u_{i+1,j-1} + r_2^V u_{i,j} + r_1^V u_{i,j-1} = f^V; \\
& (1 \leq i \leq M - 1; 1 \leq j \leq N)
\end{aligned} \tag{2.14}$$

де M, N – кількість кроків розрахункової сітки по вертикальній и горизонтальній координатах відповідно; a, b, c, d, q, k, f – числові коефіцієнти.

Рівняння (2.12)-(2.14) складаються з урахуванням граничних умов $x = 0$ та $x = H$

В розрахунковій області крім елементів, що зайняті течією повітряного середовища, можуть також знаходитися нерухомі елементи, що містять тверді включення (наприклад, ділянки стінок). Щоб розрізнити одні елементи від інших, вводиться у вузлах сіточна функція $\gamma_{i,j}$, що дорівнює нулю, якщо цей елемент відноситься до області течії, і дорівнює одиниці, якщо це - елемент твердого тіла. Для елементів, у яких $\gamma_{i,j}=1$, замість рівнянь (2.13) та (2.14) застосовуються наступні вирази:

$$u_{i,j} = u^*_{i,j}; v_{i,j} = v^*_{i,j}, \tag{2.15}$$

де $u^*_{i,j}$ и $v^*_{i,j}$ або дорівнюють нулю, або визначені граничними умовами, якщо, наприклад, відбувається вдув повітря у потік з боку твердої стінки.

Розв'язання системи різницевих алгебраїчних рівнянь виконується методом матричної прогонки. Для деякого кроку сітки i з системи алгебраїчних рівнянь (2.13), (2.14) формуються векторні рівняння:

$$A^U U_{i+1} + B^U U_i + C^U U_{i-1} + D^U P_i + Q^U V_i + R^U V_{i-1} = F^U; (1 \leq i \leq M) \tag{2.16}$$

$$A^V V_{i+1} + B^V V_i + C^V V_{i-1} + D^V P_i - D^V P_{i+1} + Q^V U_{i+1} + R^V U_i = F^V; (1 \leq i \leq M-1) \quad (2.17)$$

де $U_i [1:N-1]$; $V_i [1:N]$; $P_i [1:M]$ – вектори, складовими яких є відповідні сіточні функції $u_{i,j}$ ($1 \leq j \leq N-1$); $v_{i,j}$ та $p_{i,j}$ ($1 \leq j \leq N$) на кроці з номером i по вертикалі; A, B, C, D, Q, R – матриці, що містять коефіцієнти відповідних рівнянь, що складені з врахуванням значень сіточної змінної $\gamma_{i,j}$ та граничних умов для $u_{i,j}$ і $v_{i,j}$ при $j=1$ та $j=N$; F – вектори правих частин рівнянь (2.13) та (2.14), що також відповідають граничним умовам.

Векторна форма рівняння (2.12) має вигляд:

$$K^U_i U_i + K^V_i V_i - L^V_i V_{i-1} = F^P; (1 \leq i \leq M), \quad (2.18)$$

де K, L – матриці коефіцієнтів рівняння (2.12), F^P – вектор, у якого всі компоненти будуть дорівнювати нулю, крім $f_1^P = u_{i,0}/dx_1$ та $f_N^P = -u_{i,N}/dx_N$, для яких величини $u_{i,0}$ та $u_{i,N}$ визначаються з граничних умов.

Система векторних рівнянь (2.16) - (2.18) розв'язується методом матричної прогонки. Для складання алгоритму послідовного виключення векторів, сформованих з невідомих величин, з системи рівнянь, приймаються для цих векторів наступні рекурентні співвідношення:

$$U_{i-1} = X^{U_{i-1}} \cdot U_i + Y^{U_{i-1}} \cdot V_i + Z^{U_{i-1}}; \quad (2.19)$$

$$V_{i-1} = X^{V_{i-1}} \cdot V_i + Y^{V_{i-1}} \cdot U_i + Z^{V_{i-1}}; \quad (2.20)$$

$$P_i = P'_i + P''_i; \quad (2.21)$$

$$P''_i = X^{P_i} \cdot U_i + Y^{P_i} \cdot V_i + Z^{P_i}, \quad (2.22)$$

де X, Y, Z – матриці и вектори, що підлягають визначенню на етапі прямої матричної прогонки.

Вектор P_i представляється у вигляді суми двох векторів P'_i и P''_i . При цьому

складові вектора $\mathbf{P}'_{i,j}$ дорівнюють нулю, якщо $\gamma_{i-1,j}=0$, та мають скінчені значення при $i=1$, або якщо $\gamma_{i-1,j}=1$. Складові вектора \mathbf{P}''_i мають нульові значення при $\gamma_{i-1,j}=1$, а при $\gamma_{i-1,j}=0$ представляються у вигляді лінійної залежності від векторів \mathbf{U}_i и \mathbf{V}_i . Така форма для \mathbf{P}_i приймається тому, що, як буде показано нижче, матриці $\mathbf{X}^{\mathbf{P}_i}$, $\mathbf{Y}^{\mathbf{P}_i}$ та вектор $\mathbf{Z}^{\mathbf{P}_i}$ зазвичай розраховуються на кроці $i-1$, а потім використовується на кроці i . Якщо ж на кроці $i-1$ деякі елементи сітки відповідають значенням $\gamma_{i-1,j}=1$ (тобто, якщо вони зайняті твердими елементами стінки), то в цих елементах різниці рівняння у формі (2.12) - (2.14) не складаються. Тому визначити з них співвідношення для $p_{i,j}$ неможливо. Тому, деякі складові вектора \mathbf{P}_i не можуть бути знайдені на кроці $i-1$ у вигляді лінійної залежності від \mathbf{U}_i и \mathbf{V}_i . Така залежність буде для них одержана вже на кроці i .

На першому етапі матричної прогонки розраховуються невідомі матриці \mathbf{X} , \mathbf{Y} та вектори \mathbf{Z} , що входять у вирази (2.19)-(2.22). Спочатку залежності (2.20) - (2.22) підставляються в рівняння (2.17). З перетвореного з урахуванням цих співвідношень рівняння (2.17) виключається вектор \mathbf{V}_i . Отриманий вираз для \mathbf{V}_i має вигляд:

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{S}_1^{\mathbf{V}} \mathbf{V}_{i+1} + \mathbf{S}_2^{\mathbf{V}} \mathbf{U}_{i+1} + \mathbf{S}_3^{\mathbf{V}} \mathbf{U}_i + \mathbf{S}_4^{\mathbf{V}} \mathbf{P}'_i + \mathbf{S}_5^{\mathbf{V}} \mathbf{P}_{i+1} + \mathbf{\Phi}^{\mathbf{V}} \quad (2.23)$$

$$\text{де } \mathbf{S}_1^{\mathbf{V}} = -\mathbf{\Omega}^{\mathbf{V}} \cdot \mathbf{A}^{\mathbf{V}};$$

$$\mathbf{S}_2^{\mathbf{V}} = -\mathbf{\Omega}^{\mathbf{V}} \cdot \mathbf{Q}^{\mathbf{V}};$$

$$\mathbf{S}_3^{\mathbf{V}} = -\mathbf{\Omega}^{\mathbf{V}} \cdot [\mathbf{R}^{\mathbf{V}} + \mathbf{C}^{\mathbf{V}} \cdot \mathbf{Y}^{\mathbf{V}_{i-1}} + \mathbf{D}^{\mathbf{V}} \cdot \mathbf{X}^{\mathbf{P}_i}];$$

$$\mathbf{S}_4^{\mathbf{V}} = -\mathbf{\Omega}^{\mathbf{V}} \cdot \mathbf{D}^{\mathbf{V}};$$

$$\mathbf{S}_5^{\mathbf{V}} = \mathbf{\Omega}^{\mathbf{V}} \cdot \mathbf{D}^{\mathbf{V}};$$

$$\mathbf{\Phi}^{\mathbf{V}} = \mathbf{\Omega}^{\mathbf{V}} \cdot [\mathbf{F}^{\mathbf{V}} - \mathbf{C}^{\mathbf{V}} \cdot \mathbf{Z}^{\mathbf{V}_{i-1}} - \mathbf{D}^{\mathbf{V}} \mathbf{Z}^{\mathbf{P}_i}];$$

$$\mathbf{\Omega}^{\mathbf{V}} = [\mathbf{B}^{\mathbf{V}} + \mathbf{C}^{\mathbf{V}} \cdot \mathbf{X}^{\mathbf{V}_{i-1}} + \mathbf{D}^{\mathbf{V}} \mathbf{Y}^{\mathbf{P}_i}]^{-1}.$$

Далі співвідношення (2.19) - (2.22) підставляються в рівняння (2.16). Це рівняння перетворюється вже з урахуванням виразу (2.23). З одержаного рівняння виключається вектор \mathbf{U}_i

$$\mathbf{U}_i = \mathbf{S}_1^{\mathbf{U}} \mathbf{U}_{i+1} + \mathbf{S}_2^{\mathbf{U}} \mathbf{V}_{i+1} + \mathbf{S}_4^{\mathbf{U}} \mathbf{P}'_i + \mathbf{S}_5^{\mathbf{U}} \mathbf{P}_{i+1} + \mathbf{\Phi}^{\mathbf{U}}, \quad (2.24)$$

$$\text{де } S_1^U = -\Omega^U \cdot (A^U + S_3^U \cdot S_2^V);$$

$$S_2^U = -\Omega^U \cdot S_3^U \cdot S_1^V;$$

$$S_3^U = Q^U + C^U \cdot Y_{i-1}^U + D^U \cdot Y_i^P + R^U \cdot X_{i-1}^V;$$

$$S_4^U = -\Omega^U \cdot (D^U + S_3^U \cdot S_4^V);$$

$$S_5^U = -\Omega^U \cdot S_3^U \cdot S_5^V;$$

$$\Phi^U = \Omega^U \cdot [F^U - C^U \cdot Z_{i-1}^U - D^U \cdot Z_i^P - R^U \cdot Z_{i-1}^V - S_3^U \cdot \Phi^V];$$

$$\Omega^U = [B^U + C^U \cdot X_{i-1}^U + D^U \cdot X_i^P + R^U \cdot Y_{i-1}^V + S_3^U \cdot S_3^V]^{-1}.$$

Підстановка одержаного виразу (2.24) в співвідношення (2.23) приводить до рівності:

$$V_i = G_1^V V_{i+1} + G_2^V U_{i+1} + G_4^V P'_i + G_5^V P_{i+1} + \Pi^V \quad (2.25)$$

$$\text{де } G_1^V = S_1^V + S_3^V \cdot S_2^U;$$

$$G_2^V = S_2^V + S_3^V \cdot S_1^U;$$

$$G_4^V = S_4^V + S_3^V \cdot S_4^U;$$

$$G_5^V = S_5^V + S_3^V \cdot S_5^U;$$

$$\Pi^V = \Phi^V + S_3^V \cdot \Phi^U.$$

Наступний етап розв'язання задачі полягає у виключенні з виразів (2.24) та (2.25) векторів P'_i і P_{i+1} . Як це впливає з представлення (2.21), вектор P'_i буде присутнім в виразах (2.24) та (2.25) лише у випадку, коли хоча в одна з сіточних змінних $\gamma_{i-1,j}$ буде дорівнювати одиниці. Тобто, вектор P'_i буде мати компоненти, відмінні від нуля, якщо горизонталь сітки с номером $i-1$ перетинатиме ділянку розрахункової області, що зайнята твердими включеннями, а наступні за ними

елементи з номерами i будуть вже належати області течії. Для виключення \mathbf{P}'_i необхідно скористатися рівнянням нерозривності (2.12). Внаслідок того, що складові вектора \mathbf{P}'_i за визначенням дорівнюють нулю при $\gamma_{i-1,j}=0$, рівняння (2.12) буде складатися не для всіх j ($1 \leq j \leq N$), а лише для тих $j_1 \leq j \leq j_2$, для яких $\gamma_{i-1,j}=1$. Виходячи з цього, векторне рівняння нерозривності (2.18) представляється у вигляді:

$$\Gamma_{i-1} (\mathbf{K}^U_i \mathbf{U}_i + \mathbf{K}^V_i \mathbf{V}_i + \mathbf{L}^V_i \mathbf{V}_{i-1} - \mathbf{F}^P) = 0 \quad (2.26)$$

де Γ_{i-1} -діагональна матриця, що містить відповідні значення сіточної змінної $\gamma_{i-1,j}$.

В рівняння (2.26) замість векторів \mathbf{U}_i и \mathbf{V}_i підставляються вирази (2.24), (2.25). Для вектора \mathbf{V}_{i-1} можна було б скористатися виразом (2.20), але внаслідок того, що вузлові точки сітки для функцій $v_{i-1,j}$ в цьому випадку належать елементам, для яких $\gamma_{i-1,j}=1$, матриці, що входять у вираз (2.20) можуть бути невизначеними. Тому замість \mathbf{V}_{i-1} треба підставити в рівняння (2.26) вектор $\mathbf{V}^{\Gamma}_{i-1}$, в якого всі компоненти дорівнюють нулю, крім тих, що містять визначені з умов (2.15) значення $v^*_{i-1,j}$ на твердих поверхнях (у випадку, коли з поверхні стінки відбувається вдув). Якщо гранична умова при $y=0$ представляється у вигляді розподілу швидкостей у вхідному перетині, то для $i=1$ вектор $\mathbf{V}^{\Gamma}_{i-1}$ складається з заданих значень $v_{0,j}$ на цій границі області. Якщо ж при $y=0$ замість швидкостей $v_{0,j}$ задається розподіл тиску, то вектор \mathbf{P}'_1 вважається відомим. С врахуванням викладеного, рівняння (2.26) після перетворень представляється у вигляді:

$$\mathbf{G}_4^P \mathbf{P}'_i = \mathbf{G}_1^P \mathbf{U}_{i+1} + \mathbf{G}_2^P \mathbf{V}_{i+1} + \mathbf{G}_5^P \mathbf{P}_{i+1} + \mathbf{\Pi}^P, \quad (2.27)$$

$$\text{де } \mathbf{G}_1^P = -\Gamma_{i-1} \cdot (\mathbf{K}^U_i \cdot \mathbf{S}_1^U + \mathbf{K}^V_i \cdot \mathbf{G}_2^V);$$

$$\mathbf{G}_2^P = -\Gamma_{i-1} \cdot (\mathbf{K}^U_i \cdot \mathbf{S}_2^U + \mathbf{K}^V_i \cdot \mathbf{G}_1^V);$$

$$\mathbf{G}_5^P = -\Gamma_{i-1} \cdot (\mathbf{K}^U_i \cdot \mathbf{S}_5^U + \mathbf{K}^V_i \cdot \mathbf{G}_5^V);$$

$$\mathbf{G}_4^P = \Gamma_{i-1} \cdot (\mathbf{K}^U_i \cdot \mathbf{S}_4^U + \mathbf{K}^V_i \cdot \mathbf{G}_4^V).$$

$$\mathbf{\Pi}^P = -\Gamma_{i-1} \cdot (\mathbf{K}^U_i \cdot \mathbf{\Phi}^U + \mathbf{K}^V_i \cdot \mathbf{\Pi}^V + \mathbf{L}^V_i \mathbf{V}^{\Gamma}_{i-1} - \mathbf{F}^P);$$

З рівняння (2.27) необхідно визначити вектор \mathbf{P}'_i шляхом обернення матриці G_4^P . Але ранг матриці G_4^P буде таким самим, як і матриці Γ_{i-1} (в загальному випадку меншим, ніж N). Тому безпосередньо визначити \mathbf{P}'_i шляхом обернення матриці G_4^P неможливо через те, що вона буде на головній діагоналі містити нульові елементи в строках с номерами j' , що не входять в інтервал $j_1 \leq j \leq j_2$. Таку ж форму мають і інші матриці G^P , що входять до виразу (2.27). Але з визначення вектора \mathbf{P}'_i випливає, що його компоненти с вказаними номерами j' дорівнюють нулю, тому у виразі (2.27) матрицю G_4^P можна замінити на $G_0^P = G_4^P + E_0 - \Gamma_{i-1}$, ранг якої буде дорівнювати N (E_0 – одинична матриця розмірністю $N \times N$). Така матриця G_0^P на головній діагоналі в строках с номерами j' буде містити замість нулів - одиниці. Це еквівалентно тому, що у вузлах с номерами j' задаються рівняння вигляду $p_{ij'} = 0$. Тепер вже з перетвореного виразу (2.27) можна визначити вектор \mathbf{P}'_i :

$$\mathbf{P}'_i = S_1^P \mathbf{U}_{i+1} + S_2^P \mathbf{V}_{i+1} + S_5^P \mathbf{P}_{i+1} + \Phi^P, \quad (2.28)$$

$$\text{де } S_1^P = (G_0^P)^{-1} G_1^P;$$

$$S_2^P = (G_0^P)^{-1} G_2^P;$$

$$S_5^P = (G_0^P)^{-1} G_5^P;$$

$$\Phi^P = (G_0^P)^{-1} \Pi^P.$$

Після перетворень з врахуванням рівності (2.28), вирази (2.24) и (2.25), матимуть вигляд:

$$\mathbf{U}_i = H_1^U \mathbf{U}_{i+1} + H_2^U \mathbf{V}_{i+1} + H_5^U \mathbf{P}_{i+1} + \Theta^U, \quad (2.29)$$

$$\mathbf{V}_i = H_1^V \mathbf{V}_{i+1} + H_2^V \mathbf{U}_{i+1} + H_5^V \mathbf{P}_{i+1} + \Theta^V \quad (2.30)$$

$$\text{де } H_1^U = S_1^U + S_4^U S_1^P; H_1^V = G_1^V + G_4^V S_2^P;$$

$$H_2^U = S_2^U + S_4^U S_2^P; H_2^V = G_2^V + G_4^V S_1^P;$$

$$H_5^U = S_5^U + S_4^U S_5^P; H_5^V = G_5^V + G_4^V S_5^P;$$

$$\Theta^U = \Phi^U + S_4^U \Phi^P; \Theta^V = \Pi^V + G_4^V \Phi^P.$$

Для виключення з виразів (2.29), (2.30) вектора \mathbf{P}_{i+1} знову застосовується рівняння нерозривності (2.12), але вже складене для елементів з номерами $i+1$. Внаслідок того, що для деяких номерів j сіточні змінні $\gamma_{i+1,j}$ можуть дорівнювати одиниці, векторне рівняння (2.18) представляється у вигляді:

$$(E_0 - \Gamma_{i+1}) (K_{i+1}^U U_{i+1} + K_{i+1}^V V_{i+1} + L_{i+1}^V V_i) = 0. \quad (2.31)$$

Після підстановки V_i з виразу (2.30) в (2.31), буде одержано рівняння для визначення \mathbf{P}_{i+1} :

$$H_5^P \mathbf{P}_{i+1} = H_1^P U_{i+1} + H_2^P V_{i+1} + \Theta^P, \quad (2.32)$$

$$\text{де } H_1^P = - (E_0 - \Gamma_{i+1}) \cdot (K_{i+1}^U + L_{i+1}^V \cdot H_2^V);$$

$$H_2^P = - (E_0 - \Gamma_{i+1}) \cdot (K_{i+1}^V + L_{i+1}^V \cdot H_1^V);$$

$$\Theta^P = - (E_0 - \Gamma_{i+1}) \cdot L_{i+1}^V \Theta^V;$$

$$H_5^P = (E_0 - \Gamma_{i+1}) \cdot H_5^V.$$

Як випливає з наведених виразів, деякі строки матриць H^P , а саме ті, що мають номери j , для яких $\gamma_{i+1,j}=1$, можуть містити лише нульові елементи. В цьому випадку ранг матриці H_5^P буде меншим, ніж N . Але внаслідок того, що компоненти вектора \mathbf{P}_{i+1} з такими номерами за визначенням не існують, їх формально можна прийняти будь-якими, наприклад нульовими. Це дає можливість в рівнянні (2.32) замість матриці H_5^P застосувати матрицю $H_0^P = H_5^P + \Gamma_{i+1}$, ранг якої буде вже дорівнювати N . Таким чином, з перетвореного рівняння (2.32) можна буде визначити вектор \mathbf{P}_{i+1}

$$\mathbf{P}_{i+1} = X_{i+1}^P \cdot U_{i+1} + Y_{i+1}^P \cdot V_{i+1} + Z_{i+1}^P, \quad (2.33)$$

$$\text{де } X_{i+1}^P = (H_0^P)^{-1} H_1^P;$$

$$Y_{i+1}^P = (H_0^P)^{-1} H_2^P;$$

$$Z_{i+1}^P = (H_0^P)^{-1} \Theta^P.$$

Після підстановки \mathbf{P}_{i+1} з виразу (2.33) в співвідношення (2.29) и (2.30), ці співвідношення набувають вигляду

$$\mathbf{U}_i = \mathbf{X}^U_i \cdot \mathbf{U}_{i+1} + \mathbf{Y}^U_i \cdot \mathbf{V}_{i+1} + \mathbf{Z}^U_i ; \quad (2.34)$$

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{X}^V_i \cdot \mathbf{V}_{i+1} + \mathbf{Y}^V_i \cdot \mathbf{U}_{i+1} + \mathbf{Z}^V_i , \quad (2.35)$$

де $\mathbf{X}^U_i = \mathbf{H}_1^U + \mathbf{H}_5^U \mathbf{X}^P_{i+1}$; $\mathbf{X}^V_i = \mathbf{H}_1^V + \mathbf{H}_5^V \mathbf{Y}^P_{i+1}$;

$\mathbf{Y}^U_i = \mathbf{H}_2^U + \mathbf{H}_5^U \mathbf{Y}^P_{i+1}$; $\mathbf{Y}^V_i = \mathbf{H}_2^V + \mathbf{H}_5^V \mathbf{X}^P_{i+1}$;

$\mathbf{Z}^U_i = \mathbf{\Theta}^U + \mathbf{H}_5^U \mathbf{Z}^P_{i+1}$; $\mathbf{Z}^V_i = \mathbf{\Theta}^V + \mathbf{H}_5^V \mathbf{Z}^P_{i+1}$.

З порівняння виразів (2.33)–(2.35) та (2.19)–(2.22) випливає, що співвідношення між невідомими векторами, що одержані для кроку i , подібні до співвідношень для кроку $i-1$. Звідси випливає, що вирази (2.19)–(2.22) можуть бути використані, як рекурентні співвідношення для розрахунку невідомих матриць \mathbf{X} , \mathbf{Y} та векторів \mathbf{Z} на кожному кроці $i > 1$.

Для $i = 1$ матриці \mathbf{X}_0 , \mathbf{Y}_0 та вектори \mathbf{Z}_0 повинні бути визначеними з граничних умов. якщо за умовами задачі на границі $y=0$ задані значення складових вектора швидкості $v_{0,j}$, $u_{0,j}$, матриці \mathbf{X}^U_0 , \mathbf{Y}^U_0 , \mathbf{X}^V_0 , \mathbf{Y}^V_0 будуть нульовими, а вектори \mathbf{Z}^V_0 , \mathbf{Z}^U_0 будуть складатися з відповідних значень $v_{0,j}$ та $u_{0,j}$. У випадку, коли замість $v_{0,j}$ на границе $y=0$ задається розподіл тиску, відомим виявляється вектор \mathbf{P}'_1 , а матриці \mathbf{X}^V_0 , \mathbf{Y}^V_0 складається у відповідності з рівняннями нерозривності (2.12), що записуються для $i = 1$.

Етап прямої матричної прогонки закінчується після розрахунку матриць \mathbf{X} , \mathbf{Y} та векторів \mathbf{Z} для останнього кроку $i=M$. Наступний етап полягає у розрахунку векторів \mathbf{U}_i , \mathbf{V}_i , \mathbf{P}_i для всіх значень i . З цією метою використовуються рекурентні співвідношення (2.19) – (2.22) і граничні умови при $y=y_{max}$.

Треба зазначити, що вказаний вигляд рекурентні співвідношення будуть мати лише до кроку $i=M$

$$\mathbf{U}_{M-1} = \mathbf{X}_{M-1}^U \cdot \mathbf{U}_M + \mathbf{Y}_{M-1}^U \cdot \mathbf{V}_M + \mathbf{Z}_{M-1}^U; \quad (2.36)$$

$$\mathbf{V}_{M-1} = \mathbf{X}_{M-1}^V \cdot \mathbf{V}_M + \mathbf{Y}_{M-1}^V \cdot \mathbf{U}_M + \mathbf{Z}_{M-1}^V; \quad (2.37)$$

$$\mathbf{P}_M = \mathbf{X}_M^P \cdot \mathbf{U}_M + \mathbf{Y}_M^P \cdot \mathbf{V}_M + \mathbf{Z}_M^P; \quad (2.38)$$

Внаслідок особливостей рознесеної сітки до виразів (2.36)-(2.38) додається ще одне співвідношення

$$\mathbf{U}_M = \mathbf{X}_M^U \cdot \mathbf{U}_{M+1} + \mathbf{Y}_M^U \cdot \mathbf{V}_M + \mathbf{Z}_M^U \quad (2.39)$$

Для початку виконання матричної прогонки з метою чисельного розв'язання системи рівнянь динаміки повітряної течії (2.1)-(2.3) необхідно визначити вигляд матриць $\mathbf{X}_{0,j}^U$; $\mathbf{Y}_{0,j}^U$; $\mathbf{Z}_{0,j}^U$ для рівняння (2.19) та $\mathbf{X}_{0,j}^V$; $\mathbf{Y}_{0,j}^V$; $\mathbf{Z}_{0,j}^V$ для рівняння (2.20). Вигляд цих матриць визначається з граничних умов для $y=0$. На цій границі вважається, що надлишковий тиск дорівнює нулю: $p_{1,j}=0$. Крім того $u_{0,j}=0$. З цих умов випливає, що $\mathbf{X}_{0,j}^U=0$; $\mathbf{Y}_{0,j}^U=0$; $\mathbf{Z}_{0,j}^U=0$. Оскільки величина $p_{1,j}$ вважається відомою, рівняння нерозривності(2.9), що складене для $i=1$, можна використати для визначення матриць $\mathbf{X}_{0,j}^V$; $\mathbf{Y}_{0,j}^V$ та вектора $\mathbf{Z}_{0,j}^V$. Рівняння (2.9) представляється у вигляді:

$$v_{0,j} = v_{1,j} + \frac{dy_1}{dx_j} u_{1,j} - \frac{dy_1}{dx_j} u_{1,j-1}$$

З цього виразу випливає, що елементи матриці $\mathbf{X}_{0,j,j-1}^V=0$, крім $\mathbf{X}_{0,j,j}^V=1$. Елементи матриці $\mathbf{Y}_{0,j,j-1}^V=0$, крім $\mathbf{Y}_{0,j,j}^V=dy_1/dx_j$; $\mathbf{Y}_{0,j,j-1}^V=-dy_1/dx_j$; $\mathbf{Z}_{0,j}^V=0$.

На протилежній границі розрахункової області, для якої $i=M$, приймається, що $u_{M+1,j}=0$. $p_{M,j}=0$. При таких умовах співвідношення (2.36) та (2.39) прийматимуть вигляд

$$\mathbf{X}_M^P \cdot \mathbf{U}_M + \mathbf{Y}_M^P \cdot \mathbf{V}_M + \mathbf{Z}_M^P=0;$$

$$\mathbf{U}_M = \mathbf{Y}_M^U \cdot \mathbf{V}_M + \mathbf{Z}_M^U$$

або

$$\mathbf{X}^P_M \cdot (\mathbf{Y}^U_M \cdot \mathbf{V}_M + \mathbf{Z}^U_M) + \mathbf{Y}^P_M \mathbf{V}_M + \mathbf{Z}^P_M = 0;$$

З останнього рівняння визначається вектор \mathbf{V}_M

$$\mathbf{V}_M = -(\mathbf{Y}^P_M + \mathbf{X}^P_M \mathbf{Y}^U_M)^{-1} \mathbf{X}^P_M \mathbf{Z}^U_M - (\mathbf{Y}^P_M + \mathbf{X}^P_M \mathbf{Y}^U_M)^{-1} \mathbf{Z}^P_M,$$

Далі послідовно для всіх кроків i від $i=M-1$ до $i=1$ з застосуванням співвідношень (2.19) – (2.22) розраховуються вектори \mathbf{U}_i , \mathbf{V}_i та \mathbf{P}_i . Таким чином визначаються поля швидкостей і тиску для поточного моменту часу. Для наступного кроку за часом після корегування коефіцієнтів різницьких рівнянь розрахункова процедура повторюється.

Температурне поле повітряного потоку визначається з чисельного розв'язання рівняння енергії (2.4). Скінчено-різницева апроксимація цього рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{t_{i,j} - t_{i,j}^*}{d\tau} + u_{i,j-1/2} \left(c_{tx} \frac{t_{i,j+1} - t_{i,j}}{dx_{j+1/2}} + (1 - c_{tx}) \frac{t_{i,j} - t_{i,j-1}}{dx_{j-1/2}} \right) + \\ + v_{i-1/2,j} \left(c_{ty} \frac{t_{i+1,j} - t_{i,j}}{dy_{i+1/2}} + (1 - c_{ty}) \frac{t_{i,j} - t_{i-1,j}}{dy_{i-1/2}} \right) = \\ = a_{t^*i,j+1/2} \frac{t_{i,j+1} - t_{i,j}}{dx_j dx_{j+1/2}} - a_{t^*i,j-1/2} \frac{t_{i,j} - t_{i,j-1}}{dx_j dx_{j-1/2}} + \\ + a_{t^*i+1/2,j} \frac{t_{i+1,j} - t_{i,j}}{dy_{i+1/2} dy_i} - a_{t^*i-1/2,j} \frac{t_{i,j} - t_{i-1,j}}{dy_{i-1/2} dy_i}; \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$(1 \leq i \leq M; 1 \leq j \leq N).$$

де $a_{t^*i,j} = a + \frac{c_\mu k^*_{i,j}}{\sigma_t \varepsilon^*_{i,j}}$ - ефективний коефіцієнт теплопровідності.

Вважається, що поле швидкості на даному часовому кроці вже розраховано. Як і у випадку рівнянь (2.10), (2.11) в рівнянні (2.40) застосовується протипотокова схема апроксимації перших похідних в лівій частині цього рівняння. Згідно цієї схеми

$$u_{i,j-1/2} \geq 0 : c_{tx} = 0; u_{i,j-1/2} < 0 : c_{tx} = 1$$

$$v_{i-1/2,j} \geq 0 : c_{ty} = 0; v_{i-1/2,j} < 0 : c_{ty} = 1$$

Рівняння (2.40) після групування подібних членів представляється у вигляді:

$$a^T t_{i+1,j} + b_3^T t_{i,j+1} + b_2^T t_{i,j} + b_1^T t_{i,j-1} + c^T t_{i-1,j} = f^T \quad (2.41)$$

де a^T, b^T, c^T, f^T – числові коефіцієнти, що враховують граничні умови при $j=1$ та $j=N$.

Система рівнянь (2.41) для деякого кроку i представляється у векторній формі

$$A^T \mathbf{T}_{i+1} + B^T \mathbf{T}_i + C^T \mathbf{T}_{i-1} = \mathbf{F}^T, (1 \leq i \leq M) \quad (2.42)$$

де $\mathbf{T}_i [1:N]$ – вектор, компонентами якого є сіточні функції $t_{i,j}$ на кроку i ; A^T, B^T, C^T – матриці, що містять коефіцієнти рівнянь (2.41) і враховують умови на границях $x=0$ та $x=x_{max}$; \mathbf{F}^T – вектор правих частин даних рівнянь.

Для розв'язання системи векторних рівнянь застосовується матрична прогонка. Співвідношення між векторами \mathbf{T}_i и \mathbf{T}_{i-1} задаються у вигляді:

$$\mathbf{T}_{i-1} = X^T_{i-1} \cdot \mathbf{T}_i + Z^T_{i-1} \quad (2.43)$$

Матриця X^T_0 та вектор Z^T_0 формуються з граничних умов при $y=0$. З цих умов випливає, що $Z^T_0=0$; $X^T_{0,j,j=1}=0$, крім $X^T_{0,j,j=1}=1$;

Після підстановки виразу (2.43) в рівняння (2.42) та виключення з нього вектора \mathbf{T}_i , буде одержано рекурентне співвідношення для розрахунку X^T_i и Z^T_i на наступному кроці i :

$$\begin{aligned} X^T_i &= -\Omega^T A^T \\ Z^T_i &= \Omega^T (\mathbf{F}^T - C^T Z^T_{i-1}) \\ \text{де } \Omega^T &= [B^T + C^T \cdot X^T_{i-1}]^{-1} \end{aligned}$$

Після розрахунку матриць X^T_i та векторів Z^T_i для всіх кроків i від $i=2$ до $i=M$ виконується розрахунок векторів сіточних функцій від \mathbf{T}_M до \mathbf{T}_1 . Для розрахунку \mathbf{T}_M використовуються граничні умови при $y=l$. З цих умов випливає, що $\mathbf{T}_M = \mathbf{T}_{M+1}$. З рівняння (2.43) випливає, що

$$\mathbf{T}_{M+1} = X^T_M \cdot \mathbf{T}_{M+1} + Z^T_M$$

або

$$\mathbf{T}_{M+1} = (E_0 - X^T_M)^{-1} Z^T_M$$

Після визначення \mathbf{T}_{M+1} за співвідношеннями (2.43) послідовно визначається вектори \mathbf{T}_i від $i=M$ до $i=0$.

Поле концентрацій водяної пари визначається з чисельного розв'язання рівняння енергії (2.5). Скінчено-різницева апроксимація цього рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_{v,i,j} - \rho_{v,i,j}^*}{d\tau} + u_{i,j-1/2} \left(c_{\rho x} \frac{\rho_{v,i,j+1} - \rho_{v,i,j}}{dx_{j+1/2}} + (1 - c_{\rho x}) \frac{\rho_{v,i,j} - \rho_{v,i,j-1}}{dx_{j-1/2}} \right) + \\ & + v_{i-1/2,j} \left(c_{\rho y} \frac{\rho_{v,i+1,j} - \rho_{v,i,j}}{dy_{i+1/2}} + (1 - c_{\rho y}) \frac{\rho_{v,i,j} - \rho_{v,i-1,j}}{dy_{i-1/2}} \right) = \\ & = D_{*i,j+1/2} \frac{\rho_{v,i,j+1} - \rho_{v,i,j}}{dx_j dx_{j+1/2}} - D_{*i,j-1/2} \frac{\rho_{v,i,j} - \rho_{v,i,j-1}}{dx_j dx_{j-1/2}} + \\ & + D_{*i+1/2,j} \frac{\rho_{v,i+1,j} - \rho_{v,i,j}}{dy_{i+1/2} dy_i} - D_{*i-1/2,j} \frac{\rho_{v,i,j} - \rho_{v,i-1,j}}{dy_{i-1/2} dy_i} \end{aligned}$$

де $D_{*i,j} = D + \frac{C_\mu k_{*i,j}^2}{\sigma_c \varepsilon_{*i,j}}$ ефективний коефіцієнт дифузії. Метод розв'язання системи різницевих рівнянь для концентрації водяної пари аналогічний методу, що застосовується для системи різницевих рівнянь для температури (2.40).

Скінчено-різницева апроксимація рівнянь $k - \varepsilon$ моделі турбулентності (2.6), (2.7) виконується за схемою:

$$\begin{aligned} & \frac{k_{i,j} - k_{i,j}^*}{d\tau} + u_{i,j-1/2} \left(c_{kx} \frac{k_{i,j+1} - k_{i,j}}{dx_{j+1/2}} + (1 - c_{kx}) \frac{k_{i,j} - k_{i,j-1}}{dx_{j-1/2}} \right) + \\ & + v_{i-1/2,j} \left(c_{ky} \frac{k_{i+1,j} - k_{i,j}}{dy_{i+1/2}} + (1 - c_{ky}) \frac{k_{i,j} - k_{i-1,j}}{dy_{i-1/2}} \right) = \\ & = v_{k *i,j+1/2} \frac{k_{i,j+1} - k_{i,j}}{dx_j dx_{j+1/2}} - v_{k *i,j-1/2} \frac{k_{i,j} - k_{i,j-1}}{dx_j dx_{j-1/2}} + \\ & + v_{k *i+1/2,j} \frac{k_{i+1,j} - k_{i,j}}{dy_{i+1/2} dy_i} - v_{k *i-1/2,j} \frac{k_{i,j} - k_{i-1,j}}{dy_{i-1/2} dy_i} + C_\mu \frac{k_{*i,j}^2}{\varepsilon_{*i,j}} (S^*)^2 k_{i,j} - \varepsilon_{i,j} \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\varepsilon_{i,j} - \varepsilon_{i,j}^*}{d\tau} + u_{i,j-1/2} \left(c_{\varepsilon x} \frac{\varepsilon_{i,j+1} - \varepsilon_{i,j}}{dx_{j+1/2}} + (1 - c_{\varepsilon x}) \frac{\varepsilon_{i,j} - \varepsilon_{i,j-1}}{dx_{j-1/2}} \right) + \\ & + v_{i-1/2,j} \left(c_{\varepsilon y} \frac{\varepsilon_{i+1,j} - \varepsilon_{i,j}}{dy_{i+1/2}} + (1 - c_{\varepsilon y}) \frac{\varepsilon_{i,j} - \varepsilon_{i-1,j}}{dy_{i-1/2}} \right) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= v_{\varepsilon}^{*i,j+1/2} \frac{\varepsilon_{i,j+1} - \varepsilon_{i,j}}{dx_j dx_{j+1/2}} - v_{\varepsilon}^{*i,j-1/2} \frac{\varepsilon_{i,j} - \varepsilon_{i,j-1}}{dx_j dx_{j-1/2}} + \\
&+ v_{\varepsilon}^{*i+1/2,j} \frac{\varepsilon_{i+1,j} - \varepsilon_{i,j}}{dy_{i+1/2} dy_i} - v_{\varepsilon}^{*i-1/2,j} \frac{\varepsilon_{i,j} - \varepsilon_{i-1,j}}{dy_{i-1/2} dy_i} + \\
&\quad + C_1 C_{\mu} (S^*)^2 k_{i,j} - C_2 \frac{\varepsilon_{i,j}^*}{k_{i,j}^*} \varepsilon_{i,j};
\end{aligned} \tag{2.45}$$

$$\text{де } v_k^{*i,j} = v + \frac{C_{\mu} k_{i,j}^*}{\sigma_k \varepsilon_{i,j}^*}; \quad v_{\varepsilon}^{*i,j} = v + \frac{C_{\mu} k_{i,j}^*}{\sigma_{\varepsilon} \varepsilon_{i,j}^*}$$

За аналогією з рівнянням енергії, різницеві рівняння (2.44) та (2.45) представляються у векторній формі:

$$A^K \mathbf{K}_{i+1} + B^K \mathbf{K}_i + C^K \mathbf{K}_{i-1} + D^K \mathbf{E}_i = \mathbf{F}^K; \tag{2.46}$$

$$A^E \mathbf{E}_{i+1} + B^E \mathbf{E}_i + C^E \mathbf{E}_{i-1} + D^E \mathbf{K}_i = \mathbf{F}^E, \quad (1 \leq i \leq M), \tag{2.47}$$

де $\mathbf{K}_i [1:N]$, $\mathbf{E}_i [1:N]$ – вектори, компонентами яких є сіточні функції $k_{i,j}$ та $\varepsilon_{i,j}$ на кроці i ; A, B, C, D – матриці, що містять коефіцієнти рівнянь (2.44), (2.45) та враховують умови на границях $x=0$ и $x=H$; \mathbf{F} – вектори правих частин даних рівнянь.

Для розв'язання системи векторних рівнянь (2.46), (2.47) методом матричної прогонки співвідношення між векторами \mathbf{K}_i и \mathbf{E}_i на кроках i та $i-1$ представляються у вигляді:

$$\mathbf{K}_{i-1} = X^{K_{i-1}} \cdot \mathbf{K}_i + Y^{K_{i-1}} \cdot \mathbf{E}_i + Z^{K_{i-1}}. \tag{2.48}$$

$$\mathbf{E}_{i-1} = X^{E_{i-1}} \cdot \mathbf{E}_i + Y^{E_{i-1}} \cdot \mathbf{K}_i + Z^{E_{i-1}}. \tag{2.49}$$

Матриці $X^{K_0}; Y^{K_0}; X^{E_0}; Y^{E_0}$ та вектори $Z^{K_0}; Z^{E_0}$ визначаються з граничних умов при $y=0$. З цих умов випливає, що $Z^{K_0}=0; Z^{E_0}=0; Y^{K_{0,j,j1}}=0; X^{K_{0,j,j1}}=0$, крім $X^{K_{0,j,j}}=1; Y^{E_{0,j,j1}}=0; X^{E_{0,j,j1}}=0$, крім $X^{E_{0,j,j}}=1$;

Пряма матрична прогонка проводиться наступним чином. В рівняння (2.46), (2.47) замість векторів \mathbf{K}_{i-1} и \mathbf{E}_{i-1} підставляються вирази (2.48), (2.49). Після перетворень ці рівняння матимуть вигляд

$$A^K \mathbf{K}_{i+1} + \Omega^K \mathbf{K}_i + H^K \mathbf{E}_i = \Theta^K; \quad (2.50)$$

$$A^E \mathbf{E}_{i+1} + \Omega^E \mathbf{E}_i + H^E \mathbf{K}_i = \Theta^E; \quad (2.51)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \Omega^K &= B^K + C^K \cdot X_{i-1}^K; \quad \Omega^E = B^E + C^E \cdot X_{i-1}^E; \\ H^K &= D^K + C^K \cdot Y_{i-1}^K; \quad H^E = D^E + C^E \cdot Y_{i-1}^E; \\ \Theta^K &= F^K + C^K \cdot Z_{i-1}^K; \quad \Theta^E = F^E + C^E \cdot Z_{i-1}^E. \end{aligned}$$

Далі з рівняння (2.50) визначається вектор \mathbf{K}_i :

$$\mathbf{K}_i = S_1^K \mathbf{K}_{i+1} + S_2^K \mathbf{E}_i + \Phi^K; \quad (2.52)$$

$$\begin{aligned} \text{де } S_1^K &= -(\Omega^K)^{-1} \cdot A^K; \\ S_2^K &= -(\Omega^K)^{-1} \cdot H^K; \\ \Phi^K &= (\Omega^K)^{-1} \cdot \Theta^K. \end{aligned}$$

Вираз (2.52) підставляється в рівняння (2.51), з якого визначається вектор \mathbf{E}_i :

$$\mathbf{E}_i = X_{i+1}^E \cdot \mathbf{E}_{i+1} + Y_{i+1}^E \cdot \mathbf{K}_{i+1} + Z_{i+1}^E; \quad (2.53)$$

$$\begin{aligned} \text{де } X_{i+1}^E &= -G^E \cdot A^E \\ Y_{i+1}^E &= -G^E \cdot H^E \cdot S_2^K \\ Z_{i+1}^E &= G^E \cdot (\Theta^E - H^E \cdot \Phi^K) \\ G^E &= (\Omega^E + H^E \cdot S_2^K)^{-1} \end{aligned}$$

Вираз (2.53) підставляється в співвідношення (2.52), яке після перетворень набуває вигляду

$$\mathbf{K}_i = X_{i+1}^K \cdot \mathbf{K}_{i+1} + Y_{i+1}^K \cdot \mathbf{E}_{i+1} + Z_{i+1}^K; \quad (2.54)$$

$$\text{де } X^{K_i} = S_1^{K_i} + S_2^{K_i} \cdot Y^{E_i}$$

$$Y^{K_i} = S_2^{K_i} \cdot X^{E_i}$$

$$Z^{K_i} = \Phi^{K_i} + S_2^{K_i} \cdot Z^{E_i}$$

Після розрахунків за допомогою рекурентних співвідношень (2.53), (2.54) матриць X_i , Y_i та векторів Z_i на кожному кроці i від $i=1$ до $i=M$ закінчується етап прямої матричної прогонки.

З граничних умов при $y=l$ випливає, що $K_M = K_{M+1}$; $E_M = E_{M+1}$. З рівнянь (2.48). (2.49) випливає, що

$$K_{M+1} = X^{K_M} \cdot K_{M+1} + Y^{K_M} \cdot E_{M+1} + Z^{K_M}$$

$$E_{M+1} = X^{E_M} \cdot E_{M+1} + Y^{E_M} \cdot K_{M+1} + Z^{E_M}$$

З цих рівнянь визначаються E_{M+1}

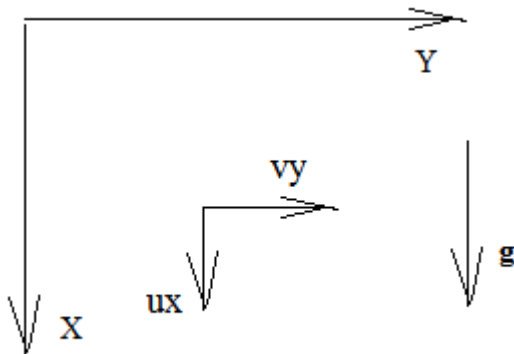
$$E_{M+1} = \Omega^E \cdot Y^{E_M} \cdot (E_0 - X^{K_M})^{-1} \cdot Z^{K_M} + \Omega^E \cdot Z^{E_M}$$

$$\text{де } \Omega^E = [(E_0 - X^{E_M}) - Y^{E_M} \cdot (E_0 - X^{K_M})^{-1} \cdot Y^{K_M}]^{-1}$$

та K_{M+1} :

$$K_{M+1} = (E_0 - X^{K_M})^{-1} \cdot Y^{K_M} \cdot E_{M+1} + (E_0 - X^{K_M})^{-1} \cdot Z^{K_M}$$

Далі послідовно від $i=M$ до $i=0$ розраховуються вектори сіткових функцій K_i , E_i .



Таким чином розраховується температурне поле над ванною.

2.4 Чисельний метод рішення рівнянь математичної моделі

Комерційний пакет SolidWorks Research Edition базується на методі кінцевих об'ємів. Всі рівняння моделей вирішувались роздільним, ітераційним методом [111]. Була розрахована нестационарна задача другого порядку в неявному формулюванні. Використана схема рішення, заснована на матричному алгоритмі сумісного рішення основних рівнянь, методом корекції тиску (pressure-based solver), який використовує поєднання фаз напівнеявним методом для енергетичних рівнянь лінії зв'язку тиску зв'язаним алгоритмом тиск-швидкість. Фактори релаксації для тиску, імпульсу і об'ємної частки були прийняті згідно рекомендацій: 0,3; 0,6 та 0,2 відповідно [111]. Схема дискредитації для імпульсу, об'ємної частки, турбулентної кінетичної енергії та швидкості дисипації турбулентної енергії була прийнята першого порядку. Розв'язок здійснювався з кроком по часу 0,001 -0,01 с в залежності від сходження та часу необхідного для взаємодії поверхнею рідини.

При використанні алгоритму phase coupled приблизно визначається початкове поле тисків, щоб визначити швидкість, використовуючи рівняння імпульсу, а потім обидва тискові та швидкісні умови коректуються, щоб задовільнити рівняння нерозривності потоку

$$P = P_0 + \beta_p P'; \quad (2.55)$$

$$v = v_0 + v', \quad (2.56)$$

де P_0 – проміжне значення тиску;

β_p – фактор нижньої релаксації для тиску, що допомагає швидшому сходженню задачі;

P' – корегування тиску;

v_0 – проміжне значення швидкості;

v' - корегування швидкості.

Корегування тиску і швидкості зв'язані наближеною формою рівняння імпульсу

$$v' = -A \frac{\partial p'}{\partial x}, \quad (2.57)$$

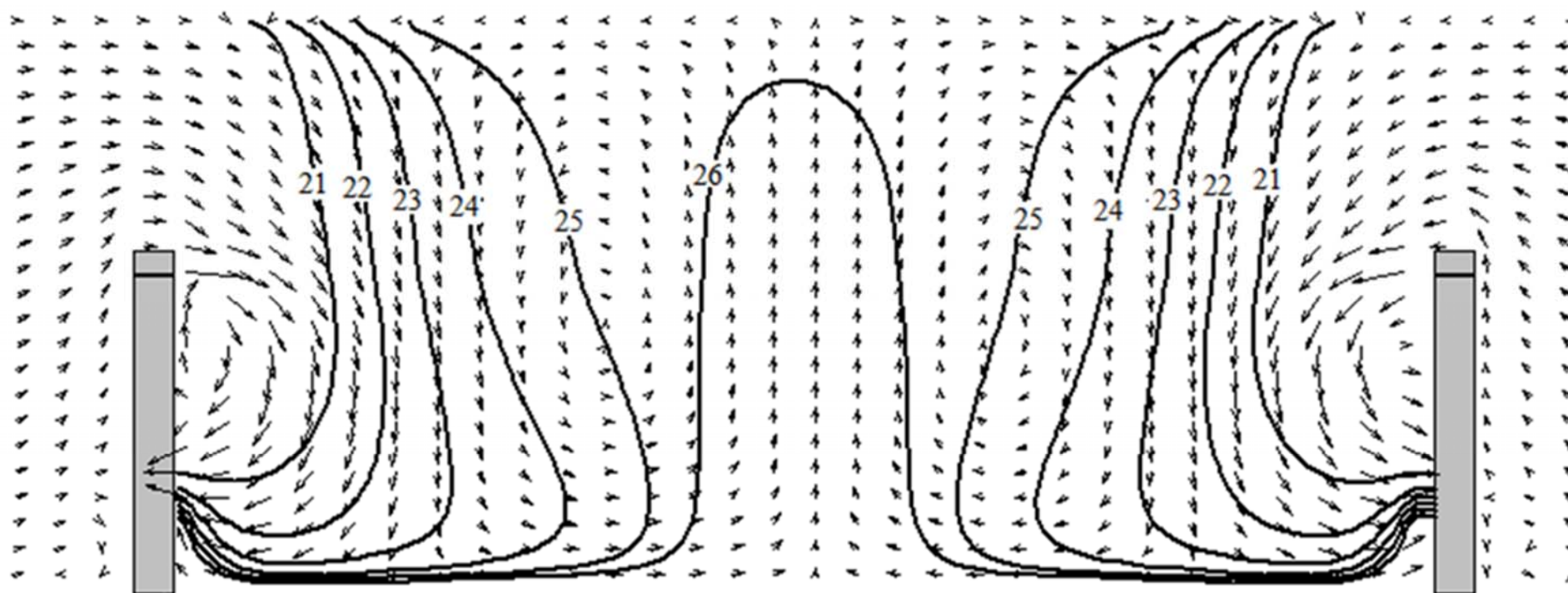
де A - фіктивне зростання часу розділене на густину, яка включає фактор імпульсу нижньої релаксації.

Оцінка швидкості і рівняння корегування швидкості комбінуються, щоб визначити значення для корегування тиску

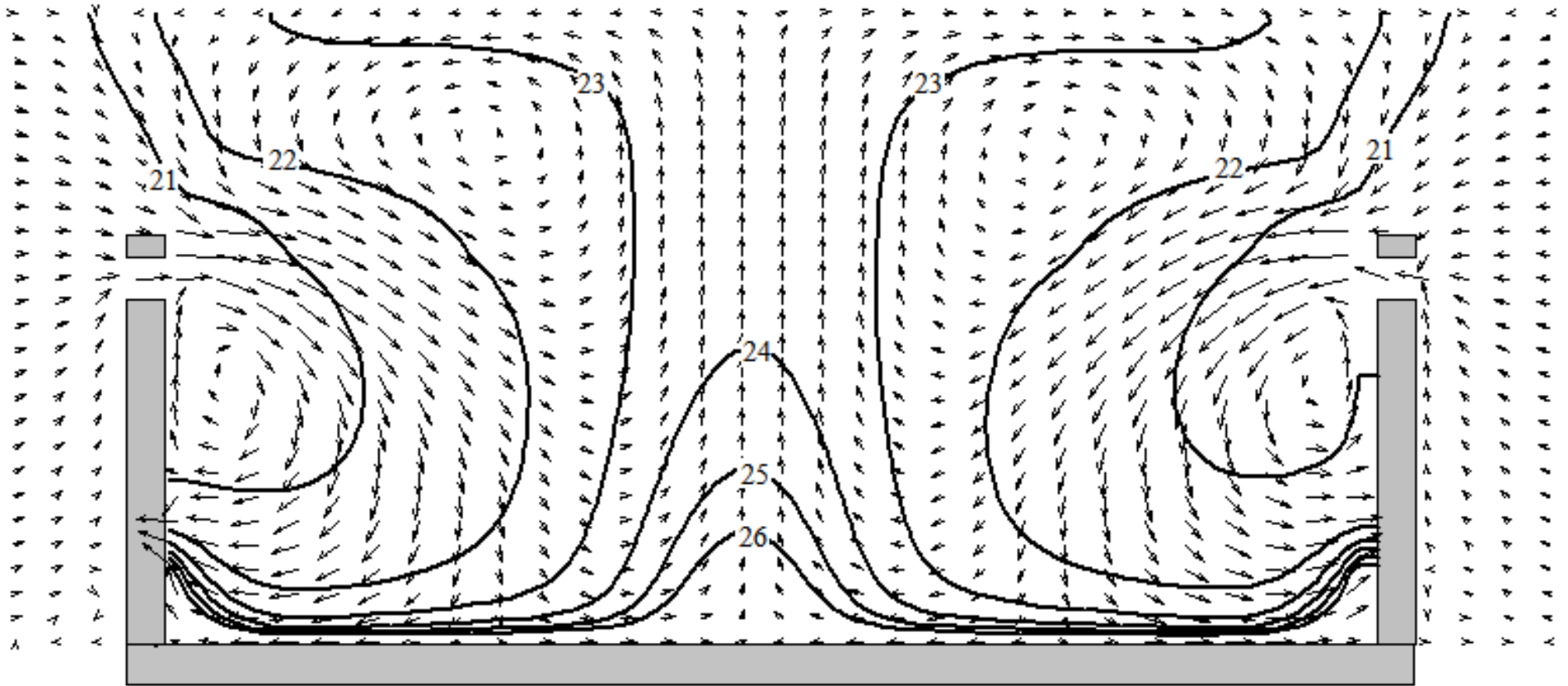
$$-\frac{\partial v_0}{\partial x} + A \frac{\partial p'}{\partial x} = 0 \quad (2.58)$$

Швидкість і тиск постійно наближуються і коректуються поки рішення не сходиться.

По запропонованим схемам місцевих відсмоктувачів виконано чисельне моделювання з побудовою векторних полів швидкостей і температур над поверхнею ванни (Рис.2.5-2.8).



a)



б)

Рис. 2.5 Розподіл температури ($^{\circ}\text{C}$) і швидкості течії повітря над поверхнею ванни за умови

$$b_{\text{wall}}/l=0,17; v_{\text{in}}/v_f=2,75, t_{\text{liq}}=35 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

а)- без ежекційного підживлення; б - з ежекційним підживленням

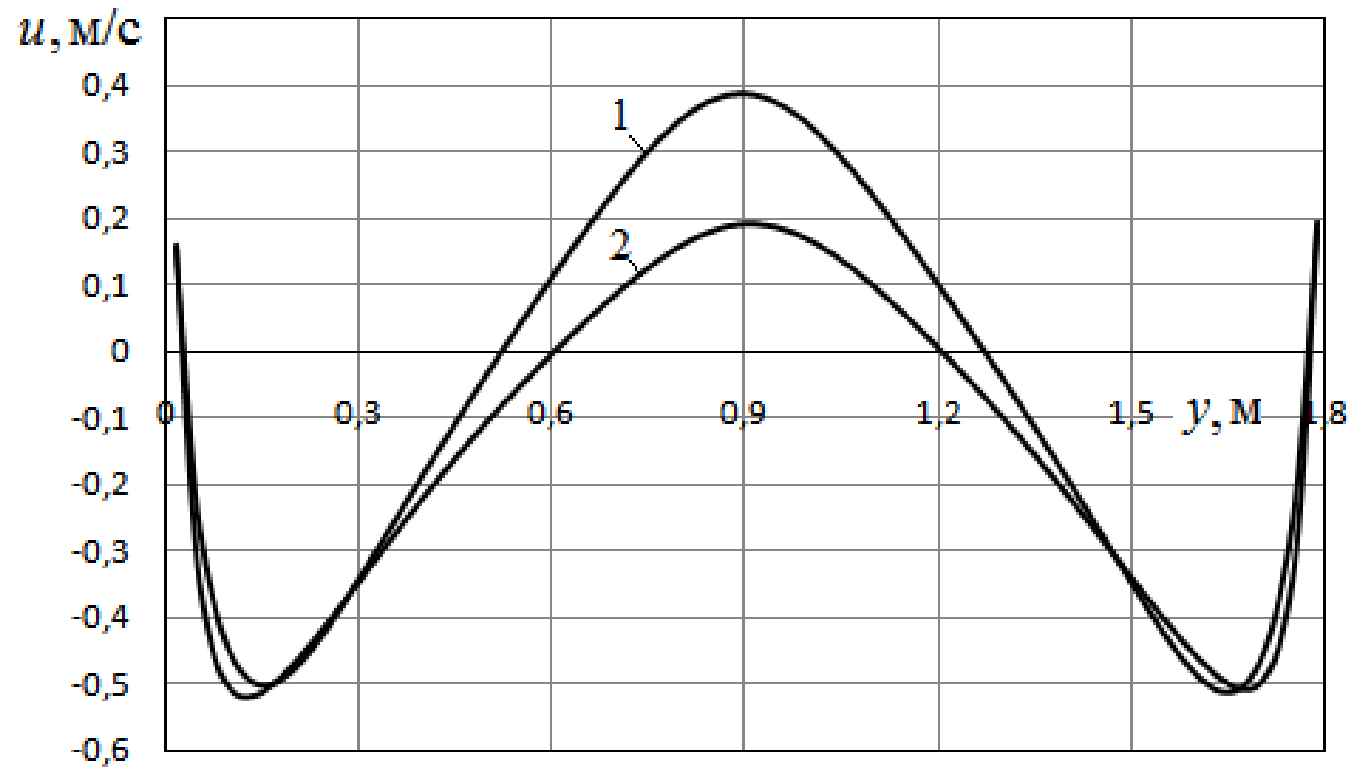


Рис. 2.6 Розподіл вертикальної швидкості u вздовж горизонтального перерізу над припливною щілиною за умови

$$b_{wall}/l=0,17; \quad v_{in}/v_l=2,75, \quad t_{liq}=35 \text{ } ^\circ\text{C};$$

1 - без ежекційного підживлення; 2 - з ежекційним підживленням

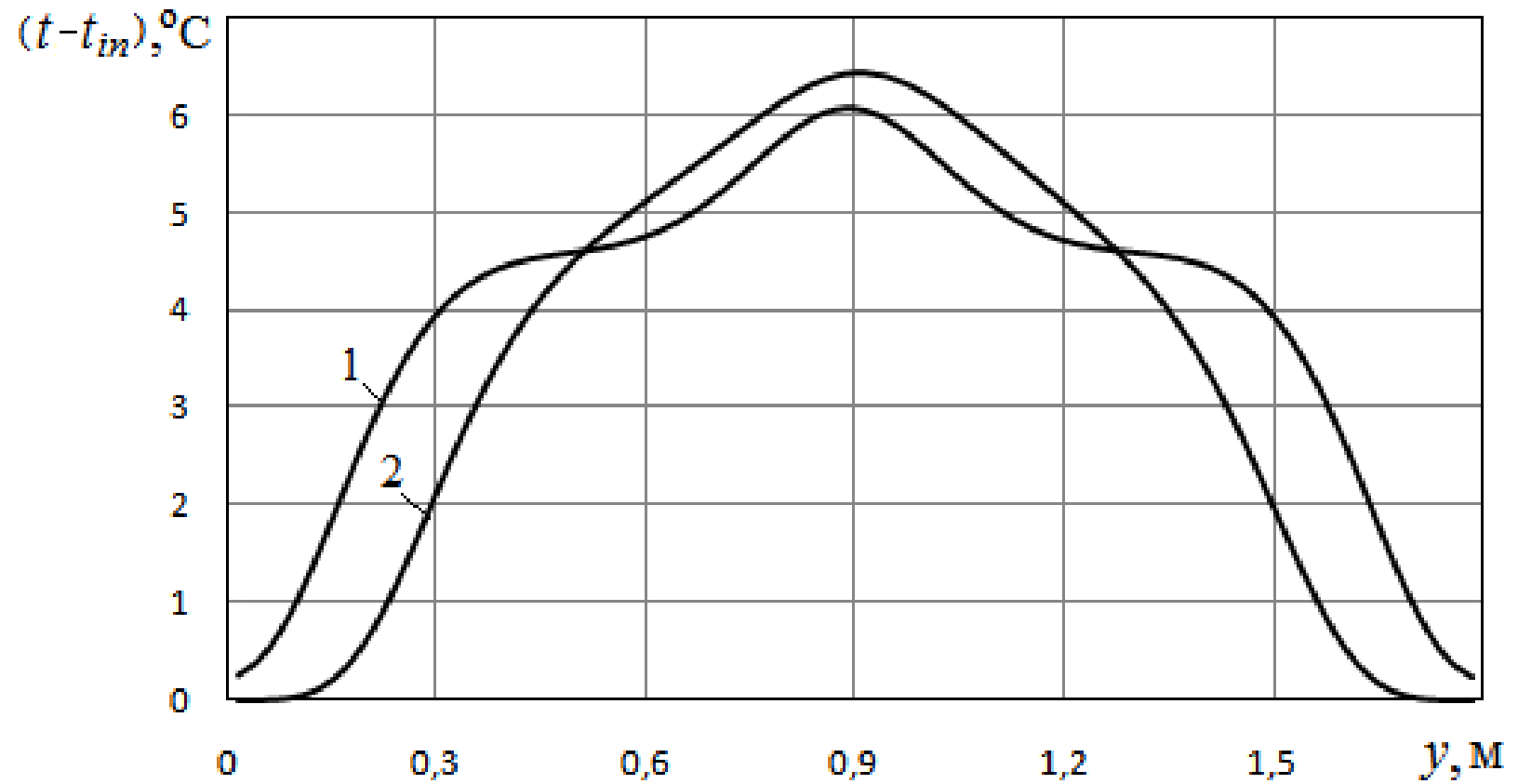


Рис. 2.7 Розподіл надлишкової температури $(t - t_{in})$ вздовж горизонтального перерізу над припливною щілиною при

$$b_{wall}/l=0,17; v_{in}/v_l=2,75, t_{liq}=35 \text{ }^\circ\text{C};$$

1 - без ежекційного підживлення; 2 - з ежекційним підживленням

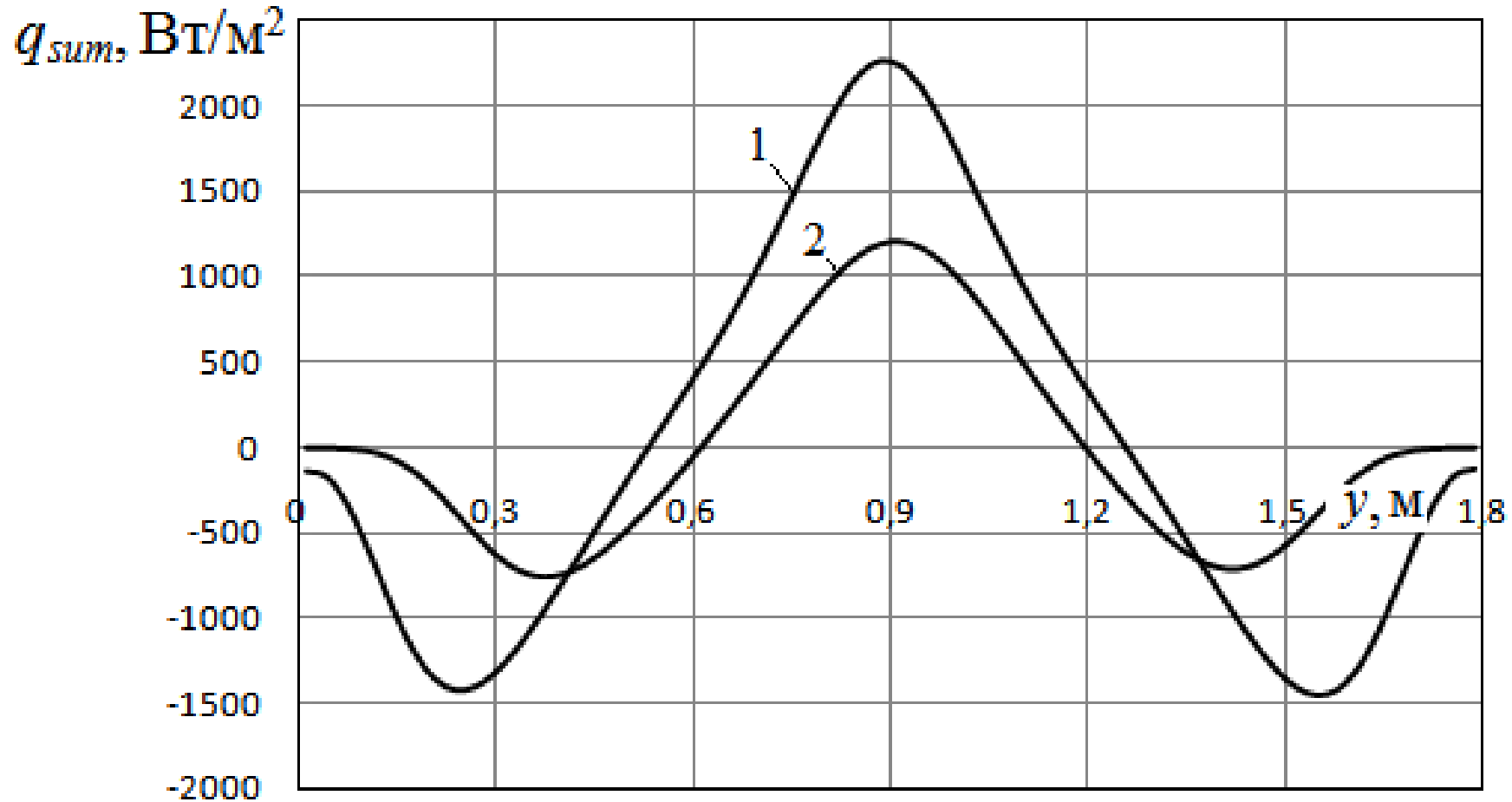


Рис. 2.8 Розподіл сумарної (конвективної та кондуктивної) густини теплового потоку вздовж горизонтального перерізу над припливною щілиною при $b_{wall}/l=0,17$; $v_{in}/v_f=2,75$, $t_{liq}=35$ °C;
 1 - без ежекційного підживлення; 2 - з ежекційним підживленням

2.3 Висновки до розділу

1. Розроблено математичну модель турбулентного переносу імпульсу, енергії і речовини у взаємодіючих аеродинамічних процесах припливних струмин з обертовими потоками при двохрівневому екранованому захисті від шкідливих речовин над відкритими поверхнями промислових ванн.

2. Виконано чисельне моделювання з побудовою векторних потоків швидкостей і температур які показують, що найбільш ефективний аеродинамічний процес відбувається при застосуванні припливних струмин з ежекційним підживленням.

3. Визначені аналітичні залежності характерних величин для температурного поля і поля концентрацій водяної пари з чисельним розв'язанням фундаментального рівняння енергії в яке введені ефективні коефіцієнти температуропровідності і дифузії, а системи рівнянь динаміки повітряної течії визначають поля швидкості та тиску.

РОЗДІЛ ІІІ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОРІВНЕВИХ ПОВІТРЯНО-СТРУМИНЕВИХ ЕКРАНІВ ПРОМИСЛОВИХ ВАНН

Для оцінки достовірності і подальшого розвитку теоретичних розробок виконані експериментальні дослідження повітряно-струминного екрану, який являє сукупність взаємодіючих повітряних потоків і процесів тепломасопереносу зі складними фізико-хімічними властивостями.

У розділі представлені планування експерименту, установка і методика проведення досліджень, обробка експериментальних даних у вигляді графіків та аналітичних залежностей. Визначалися оптимальні геометричні розміри між припливними отворами і стоком, відстань від осі повітряно-струминного екрану до дзеркала рідини, ширина щілинного стоку. В режимі граничного вловлювання визначалися відносна витрата видаляемого повітря, відносна довжина циркуляційної зони та відносна критична швидкість від основних геометричних параметрів.

3.1. Задача досліджень. Експериментальна установка. Методика проведення експерименту. Оцінка похибки експерименту

Для вирішення задачі локалізації шкідливих речовин від промислових ванн необхідно вивчити характер розповсюдження повітряних потоків, визначити та оптимізувати геометричні та аеродинамічні характеристики повітряного екранування, інтенсивність затухання швидкості результуючих повітряних потоків для різних співвідношень припливних струмин та спектрів всмоктування бортових відсмоктувачів.

Моделювання повітряних і теплових процесів в об'ємі над поверхнею рідини ванни виконано у відповідності до методики ЛБІ [66], яка обмежує довільний вибір множників перетворення лінійним масштабом і масштабом

швидкостей повітряних потоків, величини яких вибрані на основі постановки задач досліджень і технічних обмежень у виготовленні та експлуатації моделі.

Масштаби моделювання для перетворення фізичних величин при моделюванні локалізації шкідливих речовин від промислових ванн наведені у додатку А.1.

Отримані експериментальні дані дають можливість порівняти параметри досліджуваної моделі з параметрами існуючих активованих бортових відсмоктувачів.

Для виконання експериментальних досліджень повітряно-струминного екрану створено аеродинамічний експериментальний стенд (рис. 3.1 та рис. 3.2), який працює таким чином: каналний вентилятор постійного струму 1 нагнітає повітря по повітропроводам 3 та 5 в щілинні повітророзподільники 7. Припливні струмини через щілини 8 разом з обертовим потоком через відсмоктувачі 9, утворюють дворівневий екран над поверхнею ванни 12, асимілюючи виділені шкідливості.

В якості поверхні дзеркала ванни застосовано фольгований гетинакс 15, по зовнішній поверхні якого пропускається струм необхідної потужності від трансформатора 24 (Латр РНО-250-10). Необхідний опір фольги і подібний натурним умовам розподіл теплонадходжень по площі дзеркала забезпечується прорізанням смуг однакової ширини. Регулювання температури на зовнішній поверхні гетинаксу здійснюється зміною напруги, що подається на фольгу за допомогою автотрансформатора.

Повітря, що відсмоктується щілинами бортових відсмоктувачів 10 по повітропроводам 3 та 5 видаляється вентилятором 2. Для вимірювання витрати повітря до щілинних повітророзподільників та бортових відсмоктувачів передбачено діафрагми 6 та встановлення дросель-клапанів підвищеної герметизації 4. Для вимірювання витрати повітря в діафрагмах 6 виконано кільце усереднення з 4-ма штуцерами, до яких приєднано компактний електронний дифманометр 28 Testo 512 (Свідоцтво №39-1-0001 про повірку робочого еталона)

в якому межа допустимої систематичної похибки становлять у діапазоні тисків 1,0...2,5 кПа – 0,02%, 0...1,0 кПа – 0,2 %).

Задля підвищення далекобійності припливних струмин повітряного екрану в газонепроникній стінці 11, влаштовують ежекційний отвір змінної висоти по всій довжині припливної щілини 8.

Визначення температури і вологості повітря виконується термогігрометром 26 типу Testo 608–Н1 (межі допустимої систематичної похибки відносної вологості – 3%; температури – 0,5°C), а для атмосферного тиску – барометр 27 типу БАММ–1 (межі допустимих похибок: основної – 0,2 кПа, додаткової – 0,5 кПа; потрібна точність відліку – 0,05 кПа.). Температура повітря навколо установки вимірюється термометрами лабораторними типу TGL 11998 та ТЛ-4 (ціна поділки 0,1°C), рівномірно розташованими в приміщенні 15. Запис показів приладів та обробка даних виконується за допомогою ноутбука 18.

Робота вентиляторів здійснюється через стабілізатор 21 типу СН–315 Україна – 2, що приєднаний до електромережі.

Регулювання обертів вентиляторів виконується двоступеневе: ЛАТРом 23 та резистором змінного опору 22 через вимикач 20. Для контролю напруги передбачено цифровий вольтметр типу Щ4316–М1 зблокований з ЛАТРом, що за допомогою перемикача приєднується до фольгованого електронагрівача. Ці пристрої знаходяться поза межами дії струмини. Для вимірювання параметрів повітря в струмині використано прилад 14 типу Testo 440 з датчиком швидкості та температури повітря “Нагріта куля” діаметром 3 мм. Допустимі межі систематичної похибки за швидкістю – $\pm 0,03$ м/с або $\pm 5\%$ вимірюваної величини (обирається більше значення), за температурою – $\pm 0,2^\circ\text{C}$ виробництва TESTO GMBH. Датчик закріплено на двохосьовому координатнику 13. Блок живлення приладу 25 винесено за межі дії струмини.

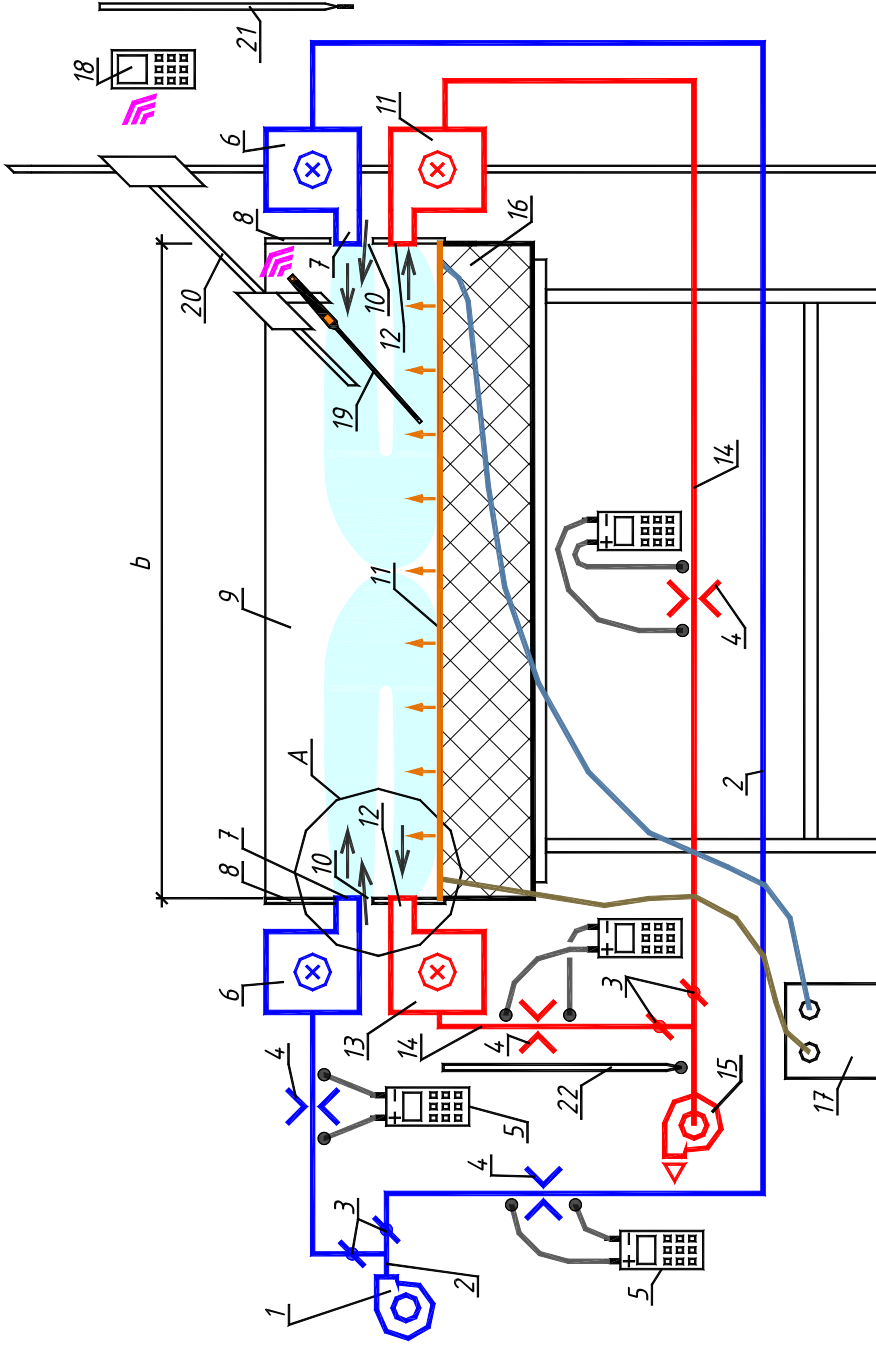


Рис. 3.1.1. Схема дослідної установки.

1 - вентилятор нагнітання; 2 - повітропроводи $\text{Ø}300$; 3 - дросель клапани; 4 - діафрагма виміру кількості повітря; 5 - компактний електронний дифманометр; 6 - щільний повітророзподільник; 7 - щілина нагнітання; 8 - газонепроникна стінка бортового відсмоктувача; 9 - координатна сітка; 10 - щілина компенсації; 11 - нагріта поверхня, що імітує дзеркало ванни; 12 - щілина бортового відсмоктувача; 13 - бортовий відсмоктувач; 14 - повітропроводи $\text{Ø}250$; 15 - вентилятор відсмоктування; 16 - теплоізоляція; 17 - регулятор нагрівача Латр РНО-250-10, що імітує поверхню дзеркала ванни; 18 - термоанемометр testo 440; 19 - телескопічний зонд термоанемометра; 20 - координатник; 21, 22 - термометри у приміщенні.

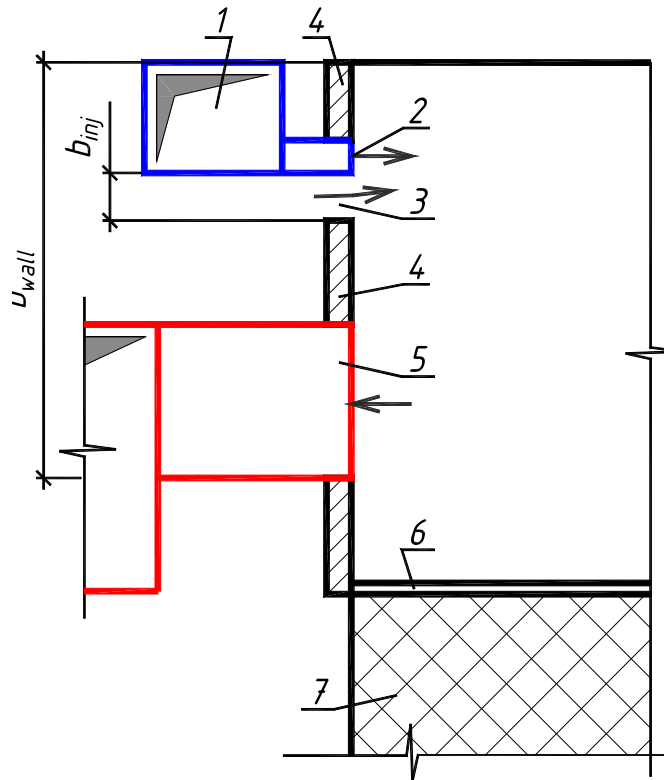


Рис. 3.2. Схема влаштування щілини підживлення припливної струмини.

1 - щілинний повітророзподільник; 2 - щілина нагнітання, що регулюється; 3 - щілина компенсації; 4 - газонепроникна стінка бортового відсмоктувача; 5 - щілина бортового відсмоктувача; 6 - нагріта поверхня, що імітує дзеркало ванни; 7 - теплоізоляція.

Дослідження виконувалися в два етапи. На першому здійснювалося калібрування діафрагм за допомогою яких визначалися витрати повітря, що подавалися на щілинні повітророзподільники та бортові відсмоктувачі. Градування діафрагм виконувалося згідно чинних нормативних документів [124]. При влаштуванні звужувальних пристроїв для вимірювання кількості рідини і газу забезпечувалися мінімальні довжини прямих ділянок повітропроводів до і після [124]. Наступним кроком наладжується системи повітряно-струминного екранування. Перевіряється і регулюються місцезнаходження контрольних точок виміру швидкостей, температур і тиску в системі. Уточняється геометрія припливних щілинних повітророзподільників з

умови співвісності струмин, які екранують поверхню дзеркала ванни, відстані влаштування витяжних отворів бортових відсмоктувачів відносно дзеркала поверхні ванни та між отворами щілинних повітророзподільників. Перевіряється рівномірність електронагрівальної поверхні ванни.

На другому етапі – випробування моделі встановлюють ті ж динамічні тиски, які використовувалися при калібруванні діафрагм з допомогою електронного дифманометру 28. Виконується серія вимірів для визначення профілів швидкостей припливнообертових струмин та профілів швидкостей біля бортових відсмоктувачів.

Для візуальних аеродинамічних досліджень використано водяна пара, що виробляється парогенератором.

При конденсації пари утворюється дрібнодисперсний туман білого кольору, який фарбує струмини. Основною перевагою водяної пари є її безпека для навколишнього середовища і те що це найбільш реально імітує випаровування рідини з ванни. Для досягнення контрастності зображення розвитку і взаємодії струмин встановлюється чорний екран. Освітлення моделі виконується прожекторами, які розташовуються рівномірно. Засоби для фотофіксації встановлюють об'єктивом на одній осі з моделлю. Для поглинання відбитого світла приміщення, штативи, та інші частини обладнання приміщення драпуються.

Експериментальні дослідження проводились при таких умовах та спрощеннях:

- струмини неізотермічні;
- припливні щілинні отвори з коефіцієнтом погасання швидкості $m = 2,5$;
- висоти припливних щілинних отворів становили $b_{in} = 0,01$ м;
- висоти щілин для підживлення струмин екранування, що розташовувались під припливними струминами, змінювались і становили $b_{inj} = 0,05-0,25$ м;

- витяжні щілинні отвори з коефіцієнтом погасання швидкості $m = 2,0$;
- висоти витяжних щілин не змінювались і становили $b_l = 0,9$ м;
- відстані між припливними і витяжними щілинами змінювались в межах $b_x = 0,05-0,5$ м;
- геометричні розміри дзеркала ванни складала $a \times b = 1,2 \times 1,8$ м.
- довжини струмин X_n , що взаємодіють, були незмінними і становили: $X_{n1} = 0,5 b_{\text{ван}}$;
- швидкості повітря у витяжних щілинах складала: $v_l = 1,9 - 2,1$ м/с.
- швидкості повітря в припливних отворах змінювались в межах: $v_{in} = 2,75 - 6$ м/с.

Під час повторних вимірювань виконувались автоматичні усереднення й визначення похибки. Коли досягались значення випадкових похибок з точністю до трьох значущих цифр так, що вони не впливають на загальну похибку, процес припиняється. Оцінка потрібної кількості дослідів не виконувалась. Вимірювання оброблялися за даними роботи [113].

Критерієм оцінки роботи повітряно-струминного екрану прийнята ефективність вловлювання шкідливостей:

$$\eta = Q_y / Q_k \quad (3.1)$$

де Q_y - кількість теплоти, що вловлюється відсмоктувачами, Вт;

Q_k - кількість конвективної теплоти, що виділяється джерелом шкідливостей, Вт.

Кількість конвективного тепла, що виділяється нагрівачем:

$$Q_k = Q_{\text{ел}} - Q_{\text{л}} - Q_{\text{т}}, \text{ Вт} \quad (3.2)$$

де $Q_{\text{ел}}$ - електрична потужність нагрівача, Вт;

$Q_{\text{л}}$ - променеве тепловиділення, Вт;

$Q_{\text{т}}$ - втрати тепла за рахунок теплопровідності, Вт.

Електрична потужність нагрівача визначалась за формулою:

$$Q_{\text{ел}} = U \cdot I, \text{ Вт} \quad (3.3)$$

де U - напруга в мережі нагрівача, В;

I - сила струму, визначалась за показниками приладів, А;

Тепловтрати випромінювання визначалися за формулою

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр1-2}} C_0 \varphi_{1-2} F_1 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \quad (3.4)$$

де $\varepsilon_{\text{пр1-2}}$ - наведені відносний коефіцієнт випромінювання при теплообміні між двома сірими поверхнями;

C_0 - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла дорівнює $5,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;

φ_{1-2} - коефіцієнт опромінення з поверхні 1 на поверхню 2;

F_1 - площа випромінюючої поверхні, м^2 ;

T_1 - температура випромінюючої поверхні, К;

T_2 - температура огорожувальних конструкцій, приймалась рівною температурі повітря, К.

Втрати тепла за рахунок теплопровідності

$$Q_{\text{т}} = KF(t_{\text{пл}} - t_{\text{в}}) \quad (3.5)$$

де K - коефіцієнт теплопередачі (виходячи з конструкції нагрівача), $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$;

F - площа поверхні пластини, м^2 ;

$t_{пл}$ - температура пластини, $^{\circ}\text{C}$;

t_b - температура навколишнього повітря, $^{\circ}\text{C}$

Кількість тепла, що видаляється з витяжним повітрям, визначалося за формулою:

$$Q_y = G_b C_p (t_y - t_b) 0.278, \text{ Вт} \quad (3.6)$$

де C_p - середня питома теплоємність повітря, $\text{кДж/кг}^{\circ}\text{C}$;

G_b - кількість повітря, кг / год ;

t_y - температура повітря, що видаляється, $^{\circ}\text{C}$.

Визначення похибок експериментальних досліджень здійснювались на основі теорії помилок [28, 43, 80]. Довірчий інтервал шуканої величини для технічних вимірів, застосовуваний звичайно зі ступенем надійності $\alpha_n = 0,95$ (ступінь ризику $P = 0,05$), визначався як

$$Y_n = Y_d \pm \Delta_{\Sigma} \quad (3.7)$$

де Y - дійсне значення величини; Δ_{Σ} - сумарна абсолютна похибка вимірювань, обумовлена умовами експерименту.

Для обчислення величини сумарної абсолютної похибки Δ_{Σ} попередньо були обчислені граничнодопустимі похибки вимірювальних приладів, які приведені в таблиці 3.1. Визначення похибки досліджень і довірчого інтервалу проводилося на підставі теорії помилок за методикою, викладеною в [28, 43].

Сумарні поправки і гранично допустимі похибки приладів

Найменування приладу	Величина, що вимірюється	Клас точності	Граничні абсолютні похибки
1. Цифровий вольтметр	ТермоЕРС, мВ	I	$\pm 0,05$
2. Цифровий вимірник напруги і струму	Напруга при постійному струмі	I	$\pm 0,2+0,1$
3. Термометр лабораторний	Температура, $^{\circ}\text{C}$	I	$\pm 0,20$
4. Термоанемометр	ТермоЕРС, мВ	I	$\pm 0,05$
5. Психрометр аспіраційний	Відносна вологість, %; Температура, $^{\circ}\text{C}$	I	$\pm 1,0$

Сумарні абсолютні систематичні похибки вимірювальних систем визначалися за формулою [28, 43]:

$$\Delta_{\Sigma c} = \pm \sqrt{\sum_i^n \Delta_{\Sigma_i}^2}, \quad (3.8)$$

де n - загальна кількість похибок за всіма елементами вимірювальної системи; Δ_{Σ_i} - сумарна похибка i -го елемента вимірювальної системи.

Гранично допустимою похибкою прямих вимірів приймалося потроєне значення середньоквадратичної похибки [28, 43]:

$$\Delta_{\text{пр}} = 3S, \quad (3.9)$$

а довірчий інтервал досліджуваної величини визначався як діапазон можливих відхилень від математичного фактора.

Середньоквадратична помилка ряду прямих вимірів визначалася за формулою [28, 43]:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\Delta_{y_i}]^2}, \quad (3.10)$$

де n - кількість вимірів; Δ_{y_i} – абсолютне відхилення виміру Y_i від середнього значення \bar{Y} . Якщо враховувати недоцільність зменшення випадкової похибки Δ_ϵ до значення меншої однієї п'ятої сумарної абсолютної похибки вимірювальної системи, необхідну кількість паралельних вимірювань для $\alpha_n = 0,95$ знайдено за формулою [28]:

$$n = \left(\frac{2S}{\Delta_\epsilon}\right)^2, \quad (3.11)$$

де $\Delta_\epsilon = 0,2\Delta_{\Sigma c}$ - мінімальна виправдана випадкова похибка.

Результати розрахунків зведені в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2

Сумарні абсолютні похибки вимірювальних систем

Найменування вимірювальної системи	Величина	Сумарна погрішність
1. Термоелектрометрична, К	t	$\pm 1,51$
3. Вимірник теплових потоків, Вт/м	g _o	$\pm 0,50$
4. Термометрична, К	t	$\pm 0,05$

При знаходженні значень параметрів прямих вимірювань сумарна похибка визначалась за формулою:

$$\Delta_\Sigma = \sqrt{\Delta_\epsilon^2 + \left[\frac{t_\alpha}{3}\right]^2 \Delta_{\Sigma c}^2}, \quad (3.12)$$

де t_α - коефіцієнт Стюдента визначений [28] при заданому значенні надійності $\alpha_n = 0,95$ та нескінченно великій кількості дослідів $\alpha_n = 2,0$.

У тому випадку, коли випадкова похибка значно менша систематичної, загальна похибка вимірювань визначалася без врахування величини випадкової похибки за формулою [28, 43, 80]:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{(\alpha W)^2 + \left[\frac{t_{\alpha}}{3}\right]^2 \Delta_{\Sigma_c}^2}, \quad (3.13)$$

де W – межа похибки підрахунку.

Відносна похибка вимірів визначалася за формулою:

$$\varepsilon' = \frac{\Delta_{\Sigma}}{Y} 100\%, \quad (3.14)$$

Для проведення експериментальних досліджень визначення середніх швидкостей і надлишкових температур повітряної струмини в середині міні-теплиці була прийнята стратегія послідовного повного факторного експерименту з реплікою [28, 43, 80]:

$$N = 2^k, \quad (3.15)$$

де k - число ступенів волі, рівне числу факторів.

Значення похибок вимірювань наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Похибки вимірювань

Назва величини і систем	2. Похибки			
	Δ_{Σ_c}	S	Δ_{Σ_i}	$\varepsilon', \%$
1. Температура повітря в робочій зоні, $^{\circ}\text{C}$	$\pm 1,5$	1,888	2,664	2,381
2. Тепловий потік від нагрітої поверхні дзеркала ванни, $\text{Вт}/\text{м}^2$	$\pm 0,25$	0,318	0,954	2,797

3. Витрата повітря, кг/м ³	±0,001	0,0017	0,051	3,163
4. Температура повітря відсмоктування, °С	±0,05	0,068	0,210	1,440
5. Температура поверхні дзеркала ванни, °С	±1,51	1,9	2,44	2,9
6. Температура повітря струмини екранування, °С	±0,05	0,07	0,204	0,68
7. Швидкість повітряної струмини, м/с	±0,01	0,025	0,032	2,31

У межах однієї градації кожний з керованих факторів варіювався на двох рівнях таким чином, щоб верхній рівень попередньої градації збігався з нижчим рівнем фактору даної градації, тобто щоб $X_{i-1}^{\max}=X_i^{\min}$. За рахунок цього здійснювалося двократне дублювання дослідів [28].

Процес формування та розвитку повітряної струмини був розглянутий у вигляді "чорного ящика" та були визначені вхідні і вихідні фактори процесу. При вивченні параметрів природних конвективних потоків між горизонтальною віддавальною поверхнею до вихідних факторів належать середня швидкість \bar{v} і середня надлишкова температура $\Delta\bar{T}$ [28, 43].

Вихідним фактором процесу є величина ефективності вловлювання шкідливостей від поверхні дзеркала ванни. До вхідних факторів процесу варто віднести:

- $x_1 = \frac{L_{in}}{L_l}$ – співвідношення витрат повітряних потоків екранування і всмоктування ;
- $x_2 = \frac{h_{wal}}{l}$ - відносна висота борта ванни до ширини ванни (l – ширина ванни);
- $x_3 = \frac{h_{inj}}{l}$ - відношення висоти отвору для підживлення припливної струмини до ширини ванни;
- $x_4 = Ar$ – критерій Архімеда.

Вивчення параметрів конвективного потоку доцільно звести до розгляду відношень абсолютних значень величин [28, 43], що дозволить зменшити

розмірність задачі i , відповідно, скоротити кількість дослідів [80]. Як незалежні параметри прийняті такі відношення абсолютних величин:

$$x_1 = (b_h^+)^{0,2} \cdot (x^+)^{0,1} \text{ і } x_2 = r, \quad (3.16)$$

що визначає значення показника у ступеневій залежності $\kappa = 2$.

До вихідних факторів зараховуємо відношення абсолютних величин \bar{u}^+ і $\bar{\theta}$.

З метою виключення систематичної похибки вимірювань застосовувалась рандомізація порядку проведення дослідів у кожній серії випробувань з використанням таблиць випадкових чисел. Вихідні фактори експерименту уведені у склад план-матриці після первинної обробки ряду прямих вимірювань [28, 43]. Через випадковий характер зміни вихідної величини Y_i у кожному рядку матриці планування знайдено середнє значення вимірювальної величини за m паралельним дослідом:

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m Y_{i_u}, \quad i=1, \dots, N, \quad (3.17)$$

де $N = 9,15,25$ – загальне число точок у матриці планування для планів з $\kappa = 2, \kappa = 3, \kappa = 4, m = 3$ – кількість планових дослідів.

Дисперсія дослідів має вигляд:

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{u=1}^m [Y_{i_u} - \bar{Y}_i]^2 \quad (3.18)$$

Однорідність вибірових дисперсій перевірено за критерієм Кохрена, що дорівнює відношенню максимальної дисперсії до суми усіх дисперсій:

$$G = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}. \quad (3.19)$$

Дисперсії вважаються однорідними у випадку, коли критерій Кохрена менше табличного [28], $G < G_{\text{табл}} = G_{1-p}(f_1 - f_2)$, де p – рівень значимості; $f_1 =$

$m - 1$; $f_2 = N$. З числом ступенів свободи $f_{\text{вiд}} = N(m - 1)$ за оцінку дисперсії відтворюваності прийнята середня дисперсія:

$$S_{\text{вiд}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (3.20)$$

Було зроблено припущення, що результати факторного експерименту досліджень будуть описані математичною моделлю полінома першого ступеня.

Рівняння регресії для 2-х факторного експерименту мало вигляд:

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1x_2 + b_{22}x_2x_2 + b_{12}x_1x_2, \quad (3.21)$$

де $b_0 \dots b_{123}$ - коефіцієнти рівняння регресії.

Рівняння регресії для 3-х факторного експерименту мало вигляд:

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + \\ + b_{13}x_1x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (3.22)$$

Рівняння регресії для 4-х факторного експерименту мало вигляд:

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + \\ + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + \\ + b_{1234}x_1x_2x_3x_4, \quad (3.23)$$

Внаслідок ортогональності матриці планування коефіцієнти рівнянь регресії розраховано незалежно один від одного за формулою:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ji}Y_i}{\sum_{i=1}^N X_{ji}}, \quad j = 1, \dots, K, \quad (3.24)$$

де j - номер фактора, $j = 1 \dots K$; N – кількість дослідів;

X_{ji} - кодування значення фактора в досліді.

Значимість коефіцієнтів регресії перевірялась за критерієм Стьюдента

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_{b_j}} \quad (3.25)$$

Коефіцієнт рівняння регресії є значимим, коли розрахункове значення критерію Стьюдента більше табличного $t_j > t_{\text{табл}} = t_p(f_2)$, де $f_2 = N(m - 1)$ - число ступенів свободи дисперсії відтворюваності.

Складові співвідношення (3.25) дисперсії коефіцієнтів регресії ортогональних планів другого порядку:

$$\begin{aligned} S_{b_0} &= \frac{S_{\epsilon i \delta}}{\sqrt{N}} \\ S_{b_j} &= \frac{S_{\epsilon i \delta}}{\sqrt{2^\kappa + 2\alpha^2}}, \quad j = 1, \dots, K. \\ S_{b_{uj}} &= \frac{S_{\epsilon i \delta}}{\sqrt{2^\kappa}}, \quad u = j, u, j = 1, \dots, K. \\ S_{b_{jj}} &= \frac{S_{\epsilon i \delta}}{2^\kappa [1 - \bar{x}_j^2]^2 + 2[\alpha^2 - \bar{x}_j^2]^2 + n_0 [\bar{x}_j^2]^2}, \quad j = 1, \dots, K., \end{aligned} \quad (3.26)$$

де $\alpha = 1$ - величина при $K=2$; $\alpha = 1,2154$ при $K=3$; $\alpha = 1,4142$ при $K=4$; n - кількість дослідів у центрі плану.

Під час переходу від кодованої форми подання факторів до натуральних одиниць (x_j^1 до x_j^2) вільний член рівняння регресії скоректований за формулою:

$$b_0 = b'_0 - \sum_{i=1}^N b_{jj} \bar{x}_j^2 \quad (3.27)$$

Адекватність рівняння регресії експерименту перевірено за критерієм Фішера, що дорівнює відношення дисперсій:

$$F = \frac{S_{a\partial}^2}{S_{\partial i\partial}^2}, \quad (3.28)$$

де $S_{a\partial}^2$ - дисперсія адекватності:

$$S_{a\partial}^2 = \frac{m \sum_{i=1}^N [\bar{Y}_i - Y_i]^2}{[N-l]}, \quad (3.29)$$

де l - число значимих коефіцієнтів у рівняння регресії.

Рівняння адекватне експериментальним даним у випадку, якщо розрахункове значення критерію Фішера менше його табличного значення:

$$F < F_{табл} = F_{1-p}(f_1 - f_2),$$

де $p=0,05$ – рівень значимості, $f_1 = N - 1$ - кількість ступенів свободи дисперсії адекватності, $f_2 = N(m - 1)$ - кількість ступенів свободи дисперсії відновлюваності.

При визначенні розподілення поля швидкості над поверхнею дзеркала рідини було встановлено, що швидкість змінюється по довжині, тому була складена матриця чотирьох факторного експерименту. Рівняння регресії визначали за формулою (3.23). План матриці наведено в табл. 3.4.

Матриця планування 4-факторного експерименту

Таблиця 3.4.

n	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	$x_1x_2x_3$	$x_1x_2x_4$	$x_1x_3x_4$	$x_2x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_4$	φ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	0,72
2	+	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	0,78
3	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+	-	0,73
4	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	+	0,85
5	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	0,87
6	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+	-	0,88
7	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	--	+	0,89
8	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	0,87
9	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+	-	0,84
10	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	0,7
11	+	-	+	+	+	-	+	-	+	+	+	+	-	+	+	-	0,13
12	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	+	-	-	1,00
13	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-0,90
14	+	+	-	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	-0,17
15	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	+	-	-	0,56
16	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-1,00

Коефіцієнти рівняння регресії визначалися за формулою (3.23) становлять:
 $b_0 = 0,8405$; $b_1 = 0,1543$; $b_2 = -0,1555$; $b_3 = 0,1912$; $b_{13} = 0,0743$; $b_{14} = 0,1187$; $b_{24} = 0,0725$;

Таблиця 3.6

План матриці

№	Матриця плану в кодах				$Y_{\text{факт. В}}$	$Y_{\text{розн.}}$
	x_1	x_2	x_3	x_4		
1	-1	-1	-1	-1	0,72	0,69
2	-1	1	0	-1	0,78	0,75
3	-1	1	1	-1	0,73	0,73
4	1	-1	-1	-1	0,85	0,86
5	1	-1	0	-1	0,87	0,86
6	-1	1	1	-1	0,88	0,87
7	1	-1	-1	-1	0,89	0,86
8	-1	-1	0	-1	0,87	0,87
9	-1	1	1	-1	0,84	0,9
10	-1	-1	-	1	0,7	0,73
11	-1	1	0	1	0,74	0,78
12	-1	1	1	1	0,69	0,75
13	1	-1	-1	1	0,84	0,9
14	1	-1	0	1	0,89	0,88
15	-1	1	1	1	0,89	0,82
16	1	-1	-1	1	0,89	0,9

$b_{124} = 0,1456$; $b_{234} = 0,0807$.

$$Y_{\text{max}} = 0,9; \quad Y_{\text{min}} = 0,69;$$

$F_{\text{розн.}} = 7,87$; $F_{\text{табл}} = 8,45$, так як $F_{\text{розн.}} < F_{\text{табл.}}$ - рівняння адекватно.

Для визначення відносної ефективності роботи системи при відповідних геометричних розмірах ємності та співвідношеннях швидкості повітряної струмини екранування до швидкості всмоктування бортового відсмоктувача отримано рівняння з натуральними значеннями:

$$0,8405 + 1,3887x_1 - 0,1555x_2 + 0,1912x_3 + 0,6687x_1x_3 - 1,0683x_1x_4 - 0,0725x_2x_4 - 1,3104x_1x_2x_4 - 0,0807x_2x_3x_4 \quad (3.30)$$

Рівняння регресії вважалось адекватне експериментальним даним у випадку, якщо розрахункове значення критерію Фішера менше його табличного значення.

Рівняння утворене перетворенням з безрозмірних координат в натуральний масштаб:

$$\eta = 0,8405 + 1,3887 \frac{L_{in}}{L_l} + 0,1912 \frac{b_{inj}}{l} + 0,155Ar + 0,6687 \frac{L_{in}}{L_l} \frac{b_{inj}}{l} - 1,0683 \frac{L_{in}}{L_l} Ar - 0,0725 \frac{b_{wal}}{l} Ar - 1,3104 \frac{L_{in}}{L_l} \frac{b_{wal}}{l} Ar - 0,0807 \frac{b_{wal}}{l} \frac{b_{inj}}{l} Ar \quad (3.31)$$

Перепишемо рівняння регресії у формі

$$\eta = 0,8405 + 1,3887 \frac{L_{in}}{L_l} + 0,1912 \frac{b_{inj}}{l} + 0,155Ar + 0,6687 \frac{v_{in}}{v_l} \frac{b_{inj}}{l} - 1,0683 \frac{v_{in}}{v_l} Ar - \frac{b_{wal}}{l} \left(0,0725Ar + 1,3104 \frac{L_{in}}{L_l} Ar + 0,0807 \frac{b_{inj}}{l} Ar \right) \quad (3.32)$$

Через додатний знак усіх параметрів членів у дужках максимальна ефективність відповідатиме найменшому можливому значенню b_{wal}/l .

Перепишемо рівняння регресії у такому вигляді:

$$\eta = 0,8405 + 1,3887 \frac{L_{in}}{L_l} + 0,155Ar - 1,0683 \frac{L_{in}}{L_l} Ar - 0,0725 \frac{b_{wal}}{l} Ar - 1,3104 \frac{L_{in}}{L_l} \frac{b_{wal}}{l} Ar + \frac{b_{inj}}{l} \left(0,6687 \frac{L_{in}}{L_l} + 0,1912 - 0,0807 \frac{b_{wal}}{l} Ar \right) \quad (3.33)$$

Відношення витрати додатне. Тому вираз у дужках перевищуватиме

$$\left(0,6687 \frac{L_{in}}{L_l} + 0,1912 - 0,0807 \frac{b_{wal}}{l} Ar \right) > \left(0,1912 - 0,0807 \frac{b_{wal}}{l} Ar \right) \quad (3.34)$$

Член у дужках вочевидь додатний якщо $(b_{wal}/l)Ar < 0,1912/0,0807 = 2,3692$, зокрема при $Ar < 2,3692$. У цьому випадку максимальна ефективність спостерігається при максимальному значенні b_{inj}/l .

Рівняння регресії набуває такого вигляду

$$\eta = \left(0,8405 + 0,1912 \frac{b_{inj}}{l}\right) + \left(1,3887 + 0,6687 \frac{b_{inj}}{l}\right) \frac{L_{in}}{L_l} + \left(0,155 - \left(0,0725 + 0,0807 \frac{b_{inj}}{l}\right) \frac{b_{wal}}{l}\right) Ar - \left(1,0683 + 1,3104 \frac{b_{wal}}{l}\right) \frac{L_{in}}{L_l} Ar \quad (3.35)$$

3.2. Аналіз експериментальних досліджень та порівняння з результатами моделювання

Аналіз величин коефіцієнтів рівняння регресії показують, що переважний вплив на вихідний параметр має фактор x_1 – співвідношення витрат повітряних потоків екранування і всмоктування. Відносна висота борта ванни до ширини ванни x_2 та відношення висоти отвору для підживлення припливної струмини до ширини ванни x_3 мають менший вплив ніж фактор x_1 , а знаки коефіцієнтів показують, що ефективність конструкції буде зростати при зменшенні висоти непроникної стінки борта ванни і збільшенні висоти отвору для підживлення припливної струмини. Фактор x_4 – критерій Архімеда має найменш значний вплив. Слід відмітити, що на ряду з лінійними ефектами на величину функції відгуку значний вплив мають і парні взаємодії факторів, найбільш суттєвим є вплив взаємодії факторів $x_1 x_3$ - співвідношення витрат повітряних потоків екранування і всмоктування та відношення висоти отвору для підживлення припливної струмини до ширини ванни та потрійні $x_1 x_2 x_4$. Аналіз знаків коефіцієнтів біля факторів оптимізації узгоджуються з висновками, що для досягнення максимальної ефективності вловлювання шкідливостей співвідношення витрат повітряних потоків екранування і всмоктування необхідно збільшувати, а відносну висоту борта ванни до ширини ванни зменшувати.

Розподіл густини теплового потоку q_w над поверхнею ванни для випадків різних значень b_{wall} наведено на рис. 3.3.

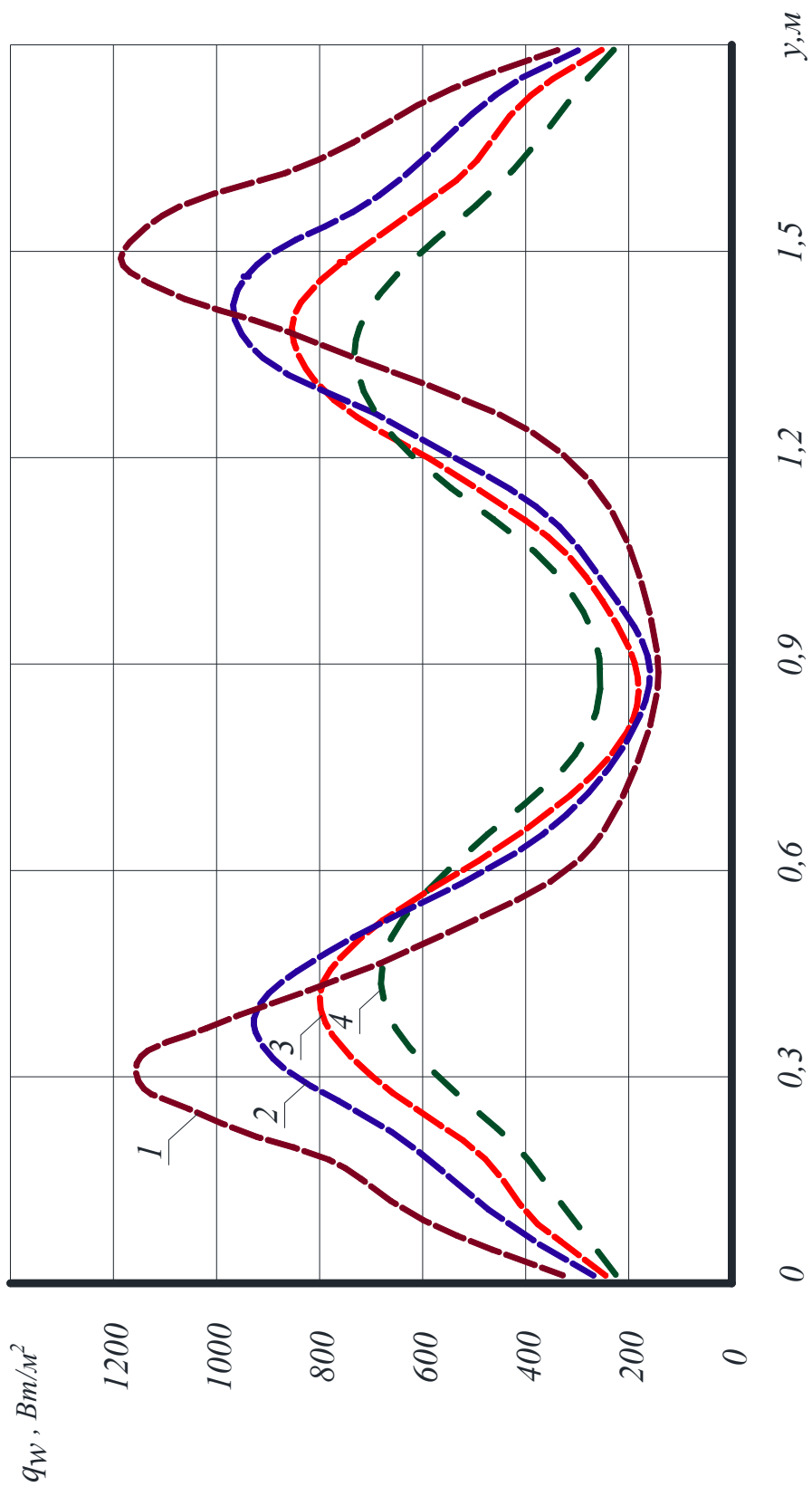


Рис.3.3. Розподіл густини теплового потоку вздовж поверхні ванни при $\nu_{in}/\nu_l=2,75$; 1 - $b_{wall}/l=0,17$; 2 - $b_{wall}/l=0,27$; 3 - $b_{wall}/l=0,3$; 4 - $b_{wall}/l=0,38$

З цього рисунку видно, що максимуми даної величини q_w розташовуються на ділянках $y = 0,3 \text{ м} \dots 0,45 \text{ м}$ та $y = 0,3 \text{ м} \dots 1,35 \text{ м}$. На цих ділянках спостерігаються високі значення швидкості повітря над поверхнею ванни, що є головною причиною інтенсифікації теплообміну. Найнижчі величини q_w відповідають середині ванни, де швидкості повітря - мінімальні. З рис. 3.3 також видно, що величина густини теплового потоку над поверхнею ванни залежить від геометричного параметра b_{wall} .

Інтегральний по поверхні ванни тепловий потік розраховується за виразом

$$Q_w = -s \int_0^{l_{bath}} \lambda_m \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} dy, \quad (3.36)$$

де λ_t - турбулентний коефіцієнт теплопровідності; s - ширина ванни, яка в даному випадку вважається рівною 1 м. Залежність від геометричного параметра b_{wall} величини Q_w наведено на рис.3.4. Як видно з цього рисунку, величина Q_w зменшується зі збільшенням b_{wall}

Результати розрахунків розподілів вертикальної швидкості u вздовж горизонтального перерізу над припливною щілиною та розподіл надлишкової температури ($t - t_{in}$) вздовж цього перерізу наведено на рис.3.5 та рис. 3.6. З наведених на рис. 3.5 та 3.6 результатів видно, що зі збільшенням параметра b_{wall} 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.

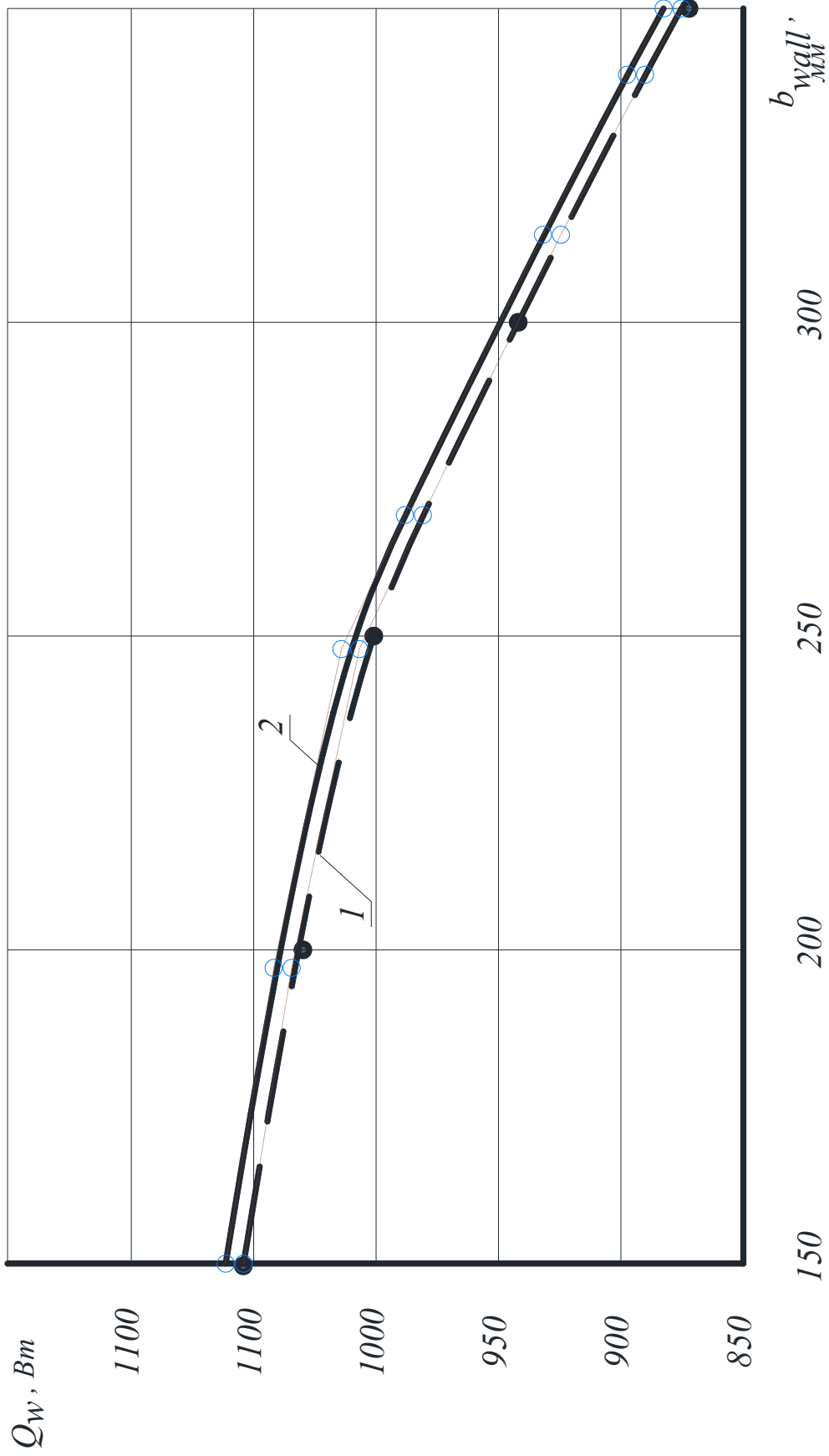


Рис. 3.4. Залежність від геометричного параметра b_{wall} інтегрального по поверхні ванни теплового потоку
 1 – експериментальні дослідження; 2– математичні моделювання

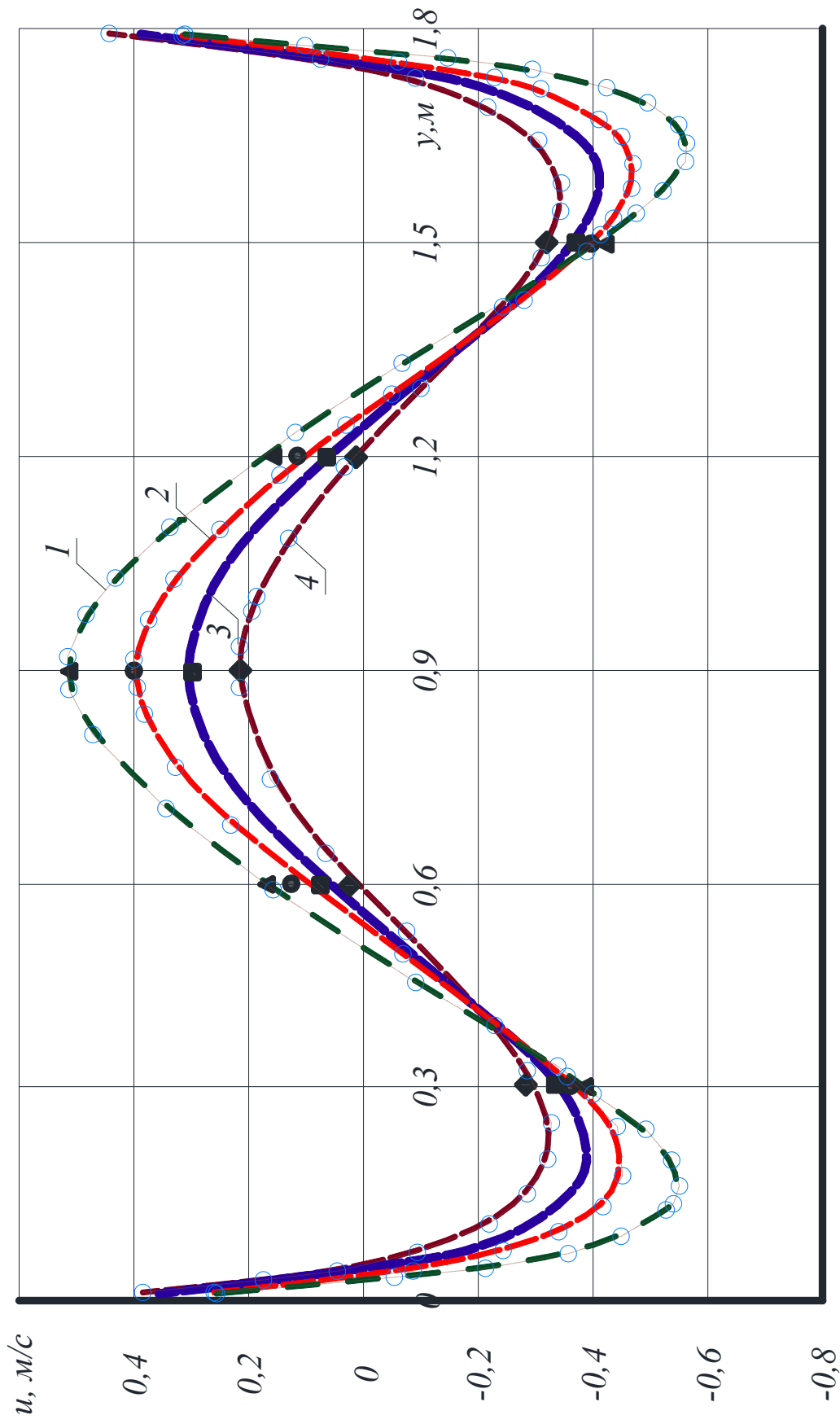


Рис.3.5. Розподіл вертикальної швидкості u вздовж горизонтального перерізу над припливною щілиною при $v_{in}/$

$v_I=2,75$; 1 - $b_{wall}/l=0,17$; 2 - $b_{wall}/l=0,27$; 3 - $b_{wall}/l=0,3$; 4 - $b_{wall}/l=0,38$

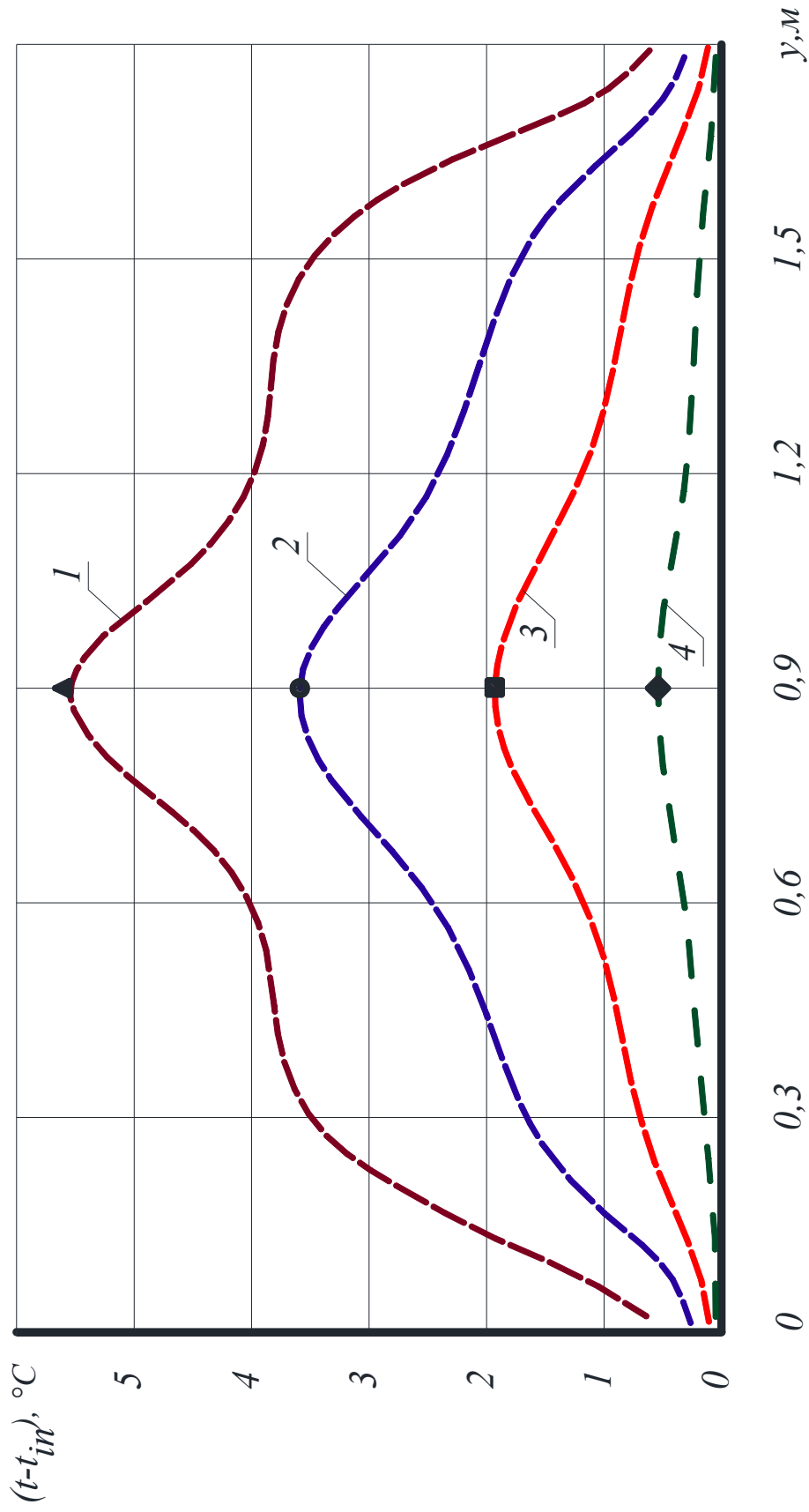


Рис.3.6. Розподіл надлишкової температури $(t - t_{in})$ вздовж горизонтального перерізу над припливною щілиною при $v_{in}/v_l=2,75$; 1 - $b_{wall}/l=0,17$; 2 - $b_{wall}/l=0,27$; 3 - $b_{wall}/l=0,3$; 4 - $b_{wall}/l=0,38$

Важливою характеристикою ефективності роботи дворівневого повітряно-струминного екрану є обсяг теплоти (або маси), що виходить за межі перерізу над бортом ванни. Розподіли сумарної (конвективної та кондуктивної) густини теплового потоку q_{sum} вздовж горизонтального перерізу над припливною щілиною наведено на рис.3.7. Ця величина розраховується за виразом

$$q_{sum} = -\lambda_m \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=h_b} + C_p \rho_a u_x (T - T_{in}), \quad (3.37)$$

де h_b - висота борту ванни.

Як видно з рис. 3.5, при $y < 0,5$ м та при $y > 1,25$ м напрямок теплового потоку - від'ємний, тобто теплота надходить ззовні в область повітряного середовища над ванною. На ділянці $0,5 \text{ м} < y < 1,25 \text{ м}$, де швидкість u_x спрямована угору, тобто за межі ванни, величина q_{sum} - додатна. Саме додатний тепловий потік, що виходить за межі простору над ванною, є джерелом забруднення повітряного середовища.

Ефективність роботи дворівневого повітряно-струминного екрану з ежекційним підживленням буде тим вищою, чим менше буде ця додатна величина.

Сумарний тепловий потік, що проходить через площину над бортом ванни розраховується за формулою

$$Q_{sum} = s \int_0^{l_{bath}} q_{sum} dy, \quad (3.38)$$

Ця величина враховує як додатний, так і від'ємний теплові потоки, що проходять через дану площину. Залежність величини Q_{sum} від b_{wall} наведено на рис. 3.8.

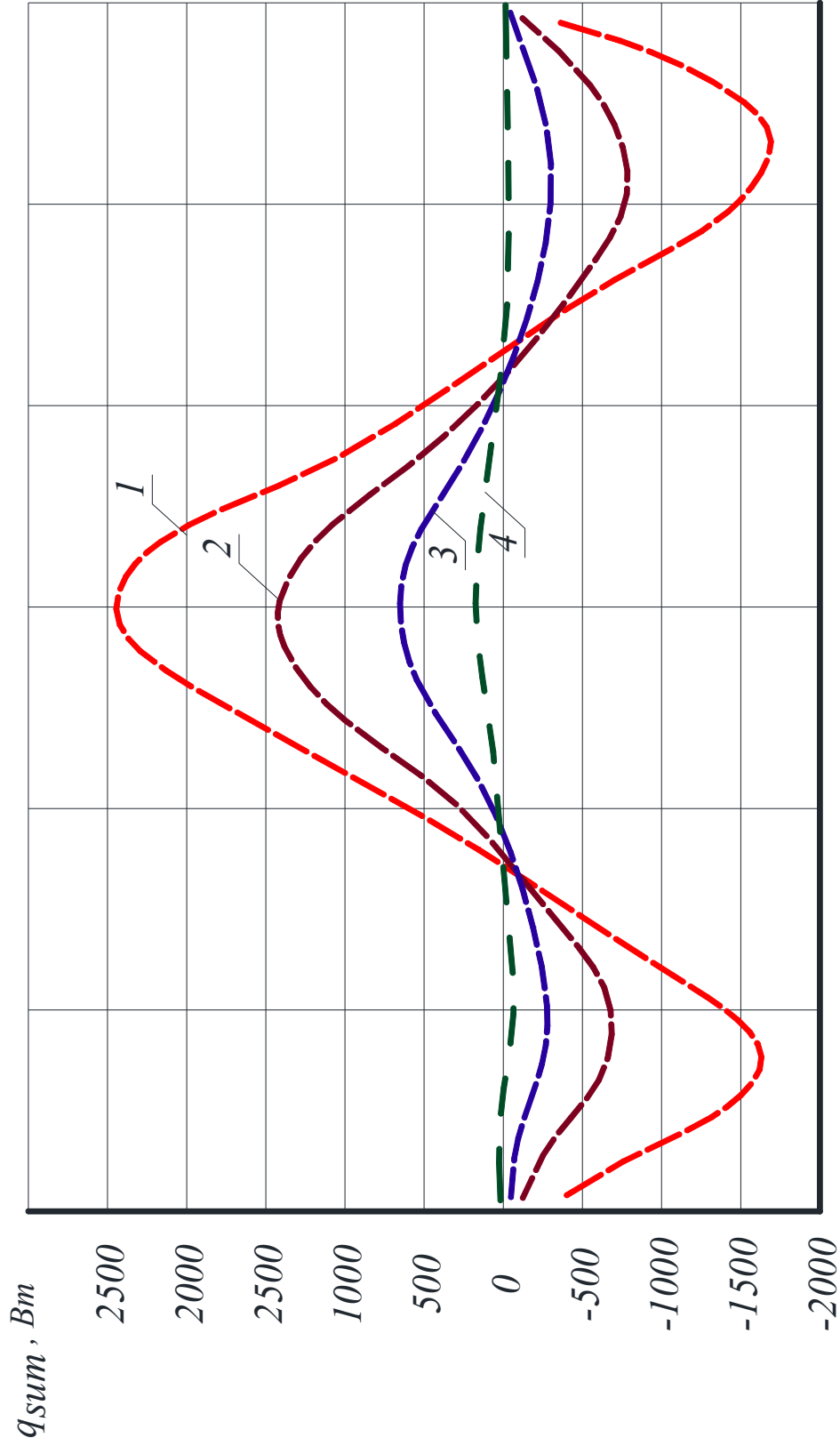


Рис. 3.7. Розподіл сумарної (конвективної та кондуктивної) густини теплового потоку вздовж горизонтального перерізу над припливною щілиною при $v_{in}/v_l=2,75$; 1 - $b_{wall}/l=0,17$; 2 - $b_{wall}/l=0,27$; 3 - $b_{wall}/l=0,3$; 4 - $b_{wall}/l=0,38$

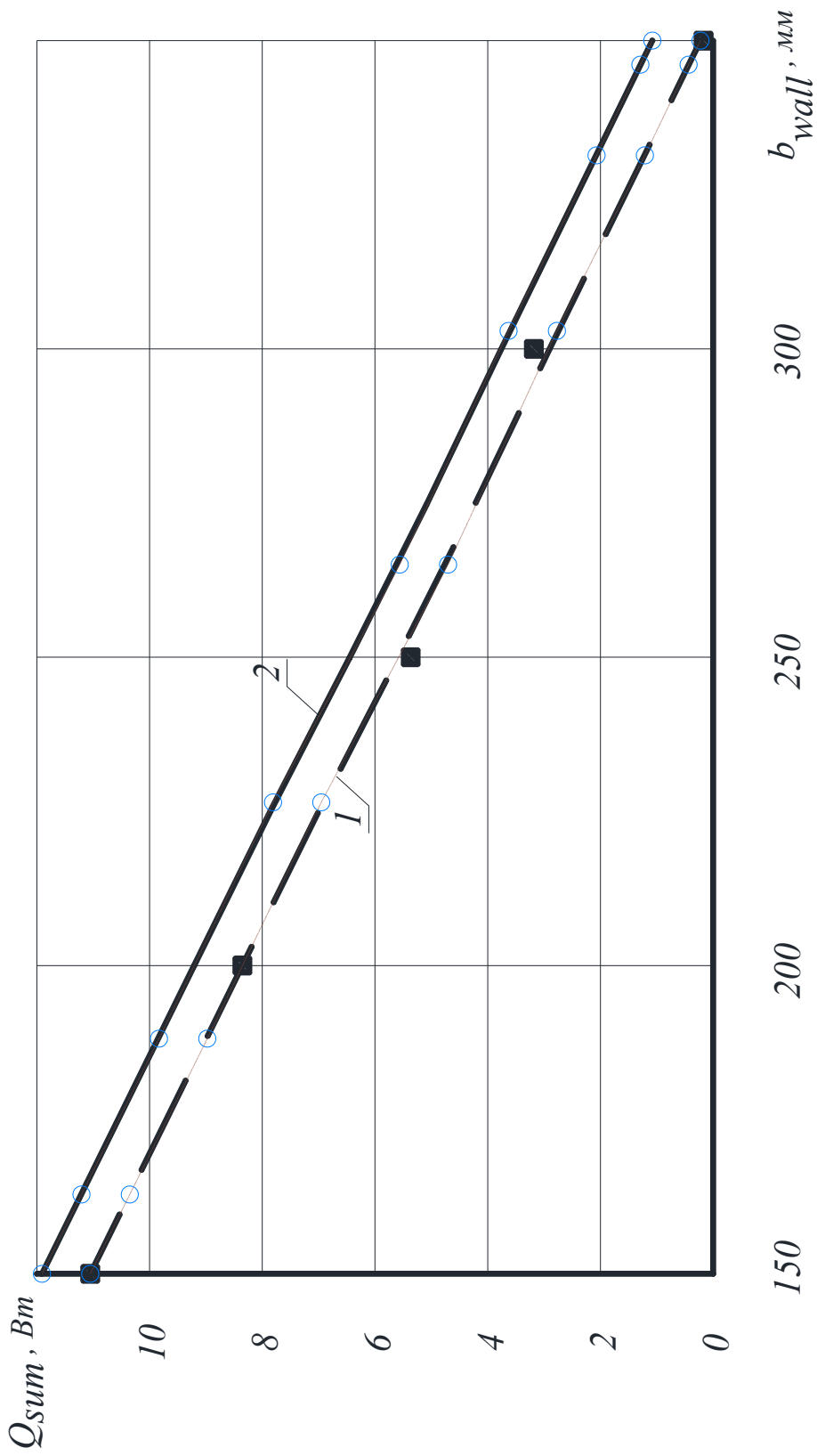


Рис. 3.8. Залежність сумарного теплового потоку над бортом ванни від параметра b_{wall} .
 1 – експериментальні дослідження; 2 – математичні моделювання

З рис.3.8 видно, що зі збільшенням b_{wall} зменшується сумарний тепловий потік через площину над бортом ванни.

Додатний тепловий потік через цю площину розраховується за виразом

$$Q^+ = s \int_{y_1}^{y_2} q_{sum} dy, \quad (3.39)$$

де y_1 і y_2 - початок і кінець ділянки, де тепловий потік над поверхнею приймає додатне значення. Залежність Q^+ від b_{wall} наведено на рис. 3.9.

З рис. 3.9, а також з рис. 3.7 видно, що зі збільшенням b_{wall} . величина Q^+ суттєво зменшується. Отже зі збільшенням параметра b_{wall} ефективність роботи дворівневого повітряно-струминного екрану збільшується.

Аеродинамічні і теплообмінні характеристики дворівневого повітряно-струминного екрану в залежності від критерія Архімеда Ar розглядаються на рис. 3.10.

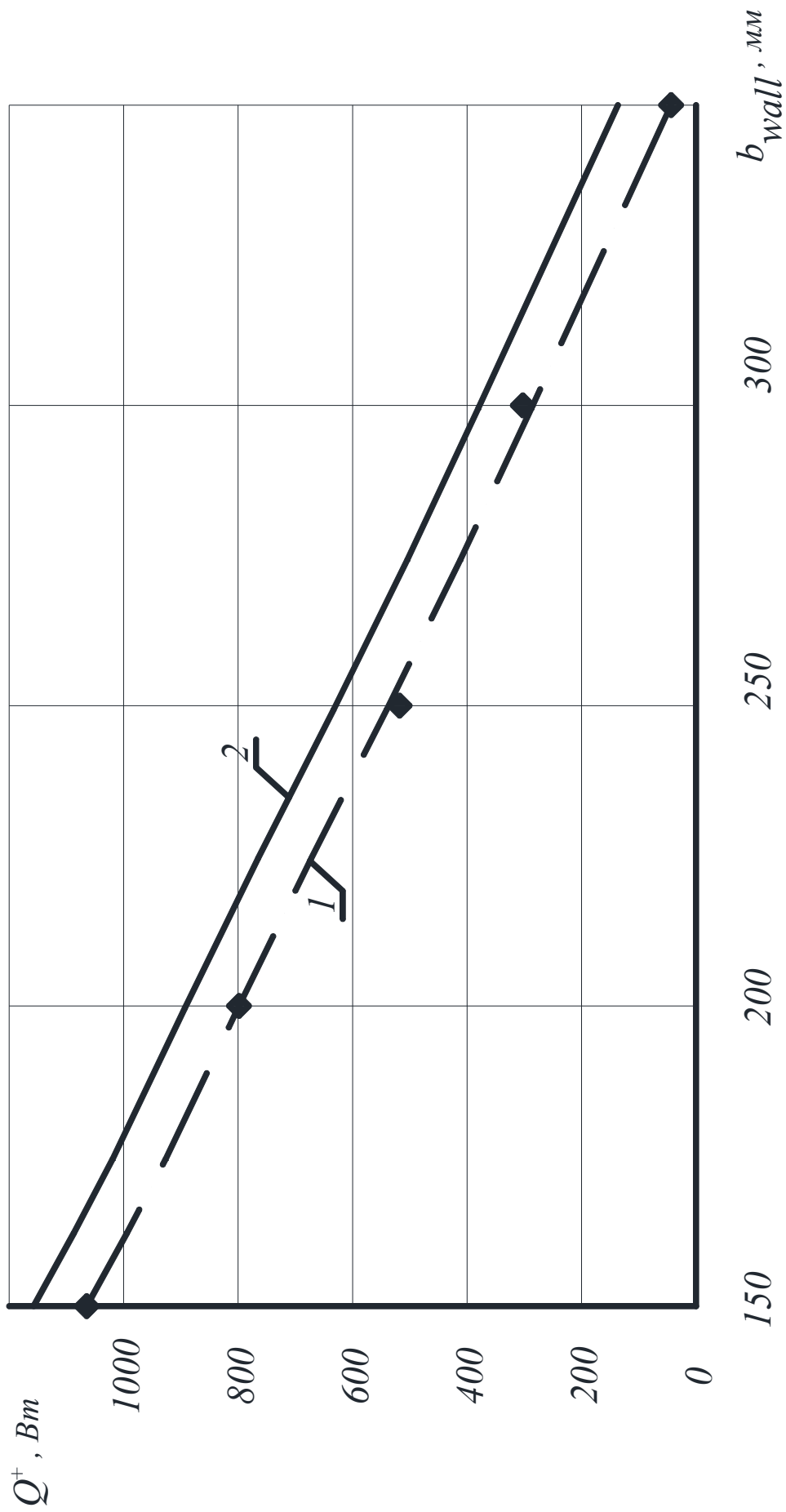


Рис.3.9. Залежність додатного теплового потоку, що передається через площину над бортом ванни, від параметра b_{wall} .

1 – експериментальні дослідження; 2- математичні моделювання

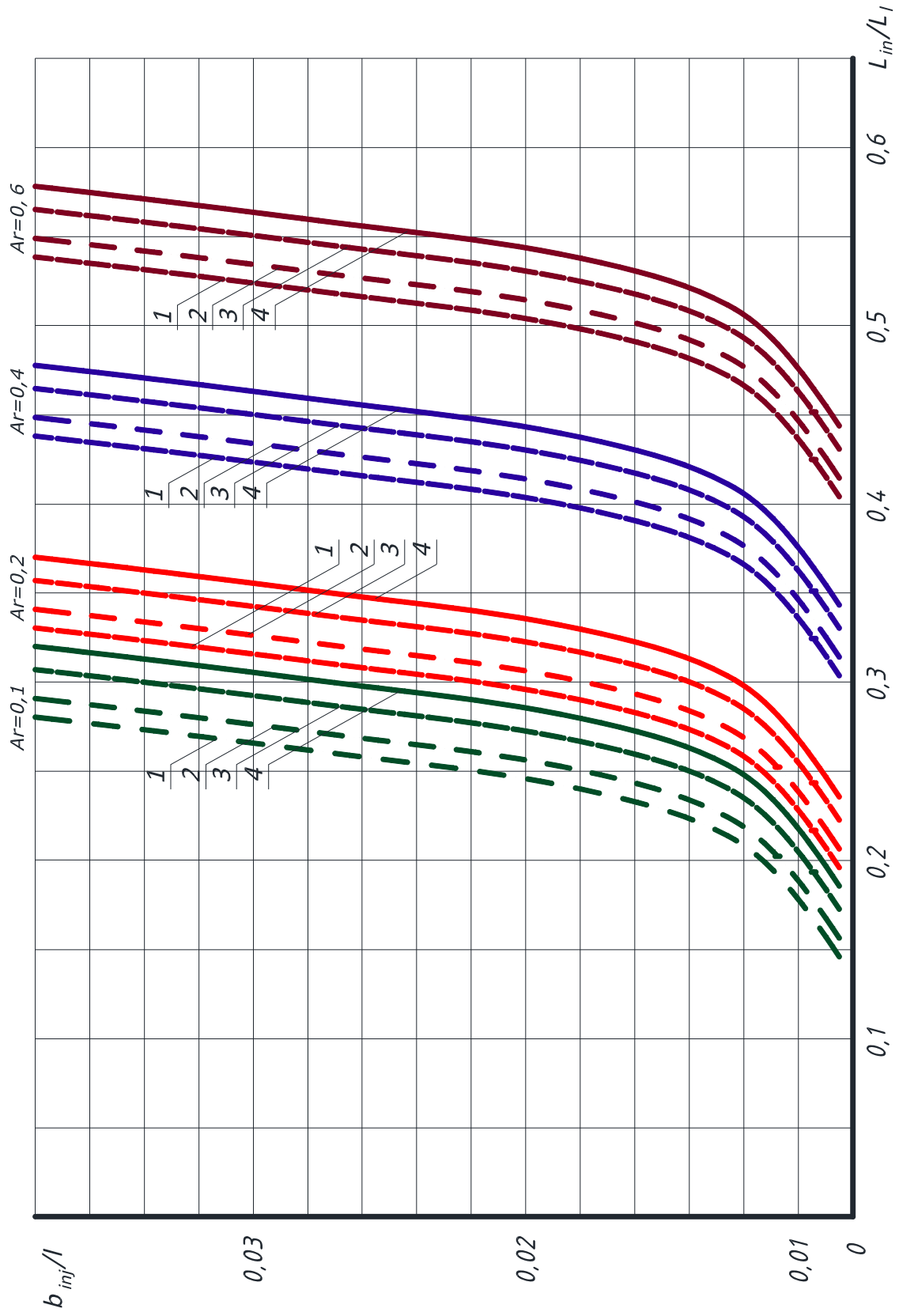


Рис.3.10. Оцінка конструктивних особливостей при номінальній ефективності $\eta=0,9$ в залежності від кількості припливного повітря і температури поверхні рідини при
 1. $b_{wat}/l = 0,11$; 2. $b_{wat}/l = 0,09$; 3. $b_{wat}/l = 0,08$; 4. $b_{wat}/l = 0,07$

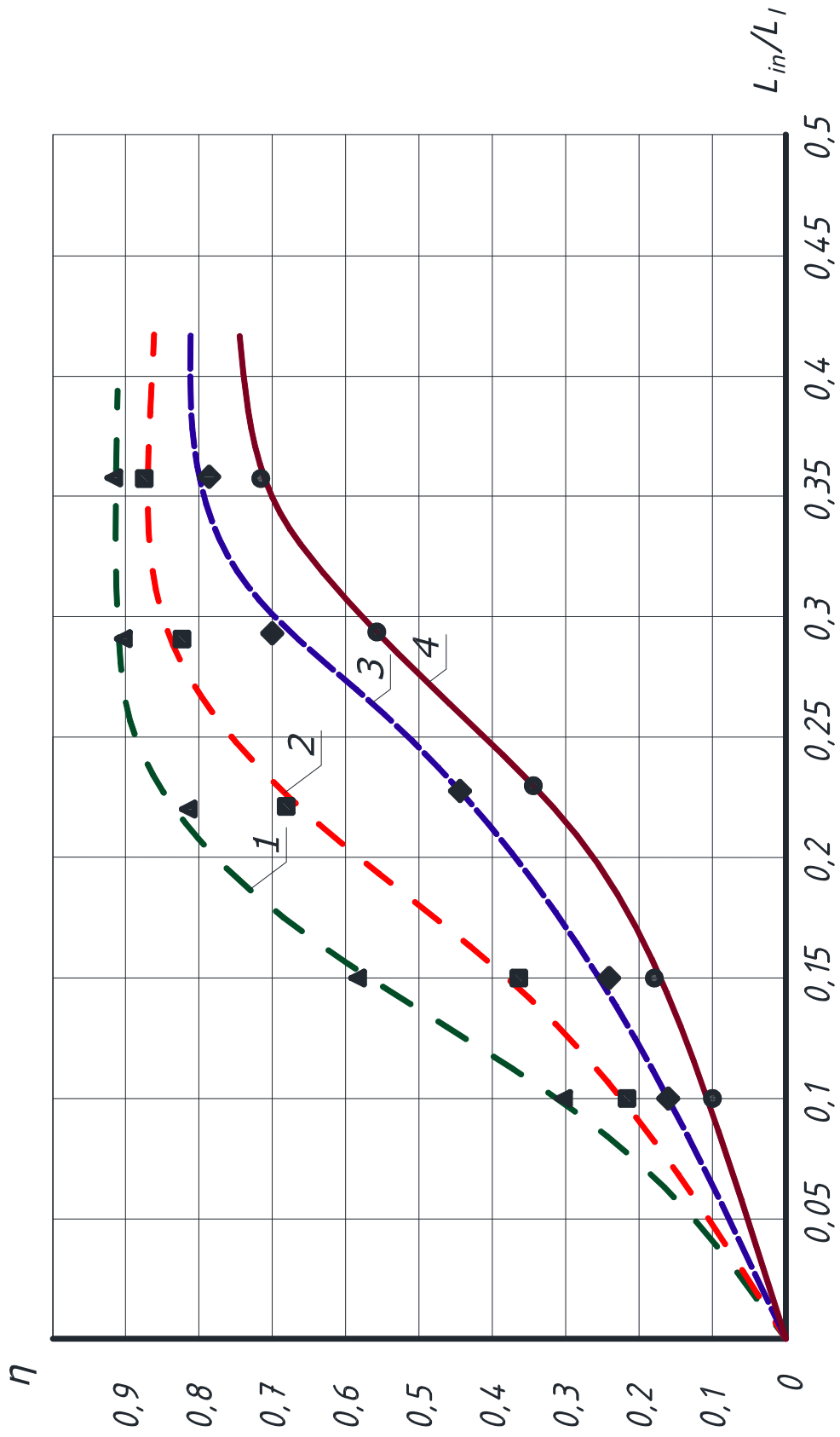


Рис.3.11. Залежність ефективності повітряно-струминного екрану від співвідношення витрат припливного та витяжного повітря при $b_{val}/l=0,07=0,07$; $b_{inj}/l=0,017$ при числах Архімеда: 1. $Ar=0,1$; 2. $Ar=0,2$; 3. $Ar=0,4$; 4. $Ar=0,6$

Графіки на рис. 3.10, а також з рис. 3.11 показують, що зі збільшенням числа Архімеда Ar і збереженні співвідношення витрат повітря припливу і відсмоктування, а також геометричних характеристик ефективність повітряно-струминного екрану суттєво знижується.

3.3 Висновки до розділу

1. Розроблено та сконструйовано лабораторну модель промислової ванни обладнану дворівневим повітряно-струминним екраном. На підставі експериментальних досліджень отримано залежності співвідношення припливного повітря та повітря, що відсмоктується 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 екрану.

2. Проведені експериментальні дослідження запропонованої конструкції повітряно-струминного екрану на підставі чисельного моделювання. Показано, що при збільшенні відносної висоти бортів до ширини ванни ефективність вловлювання шкідливостей зростає. Стабілізація і утворення саморегульованих обертових потоків над поверхнею ванни досягається при умовах збільшення висоти бортів ванни та значеннях чисел Архімеда $Ar \leq 0,3$.

3. Достовірність дослідних даних забезпечена використанням методів планування експерименту, методів статистичної обробки результатів дослідження та застосуванням високоефективних математичних методів при розробці методики проведення досліджень. Одержано широкий діапазон зміни витрат повітря струмини екранування та витрат повітря відсмоктування при різних геометричних співвідношеннях висот борта ванни, щілини підсмоктування та температури рідини ванни.

4. На підставі експериментальних досліджень визначено ефективність роботи дворівневого повітряно-струминного екрану за різних температур

поверхні рідини ванни (критерій Архімеда). Одержані емпіричні залежності для визначення витрат припливного повітря та повітря, що відсмоктується при різних співвідношеннях геометричних розмірів конструкції, що дозволяє виконувати аеродинамічний розрахунок мереж повітроводів місцевої вентиляції.

РОЗДІЛ IV. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ДВОБОРТОВОГО ПОВІТРЯНО-СТРУМИНЕВОГО ЕКРАНУ

4.1 Оптимізація параметрів відсмоктувача за ефективністю

Для уникнення складного диференціального аналізу рівняння виконано чисельний розрахунок на чотиривимірній сітці, де інтервал варіювання кожного фактора поділено на 100 рівних підінтервалів [28]. Подальше ділення сітки недоцільне через обмеження точності виготовлення елементів ванни та налаштування витрати. Обиралася та оптимальна точка, у якій ефективність η була максимальна.

Основним обмеженням є максимально можлива висота відсмоктувача B_{max} , м, що складається з ширини відсмоктувальної щілини δ_l , м, висоти газонепроникної стінки b_{wall} , м, висоти інжекційної щілини b_{inj} , м, та ширини припливної щілини δ , м, а саме

$$B_{max} = \delta_l + b_{wall} + b_{inj} + \delta, \text{ м.}$$

Оскільки перший та останній доданки суми є константами, то як параметр враховуємо сумарну висоту ежекційної щілини та газонепроникної стінки

$$b_{max} = b_{wall} + b_{inj}, \text{ м.}$$

Проаналізуємо вплив критерію Архімеда. Для цього виконаємо оптимізацію за всіма чотирма факторами. Виявлено, що зростання критерію Архімеда в даних діапазонах факторів підвищує ефективність уловлювання. Також розрахуємо ефективність уловлювання при тих же оптимальних значеннях факторів, але нульовому критерію Архімеда. І наостанок виконаємо оптимізацію трьох факторів при тому ж нульовому критерію Архімеда. Результати (рис. 4.1) показують, що критерій Архімеда суттєво впливатиме на ефективність лише при $b_{max}/l < 0,009$. При більших значеннях відхилення ефективності не перевищує 5%. При $b_{max}/l > 0,025$ відхилення не перевищує 1%. При $b_{max}/l > 0,037$ відхилення не перевищує 0,5%. При цьому можливо користуватися оптимальними значеннями

факторів при $Ar = 0,3$ і не робити додаткову оптимізацію за трьома факторами. Ця додаткова оптимізація дає приріст ефективності не більше 0,003 %.

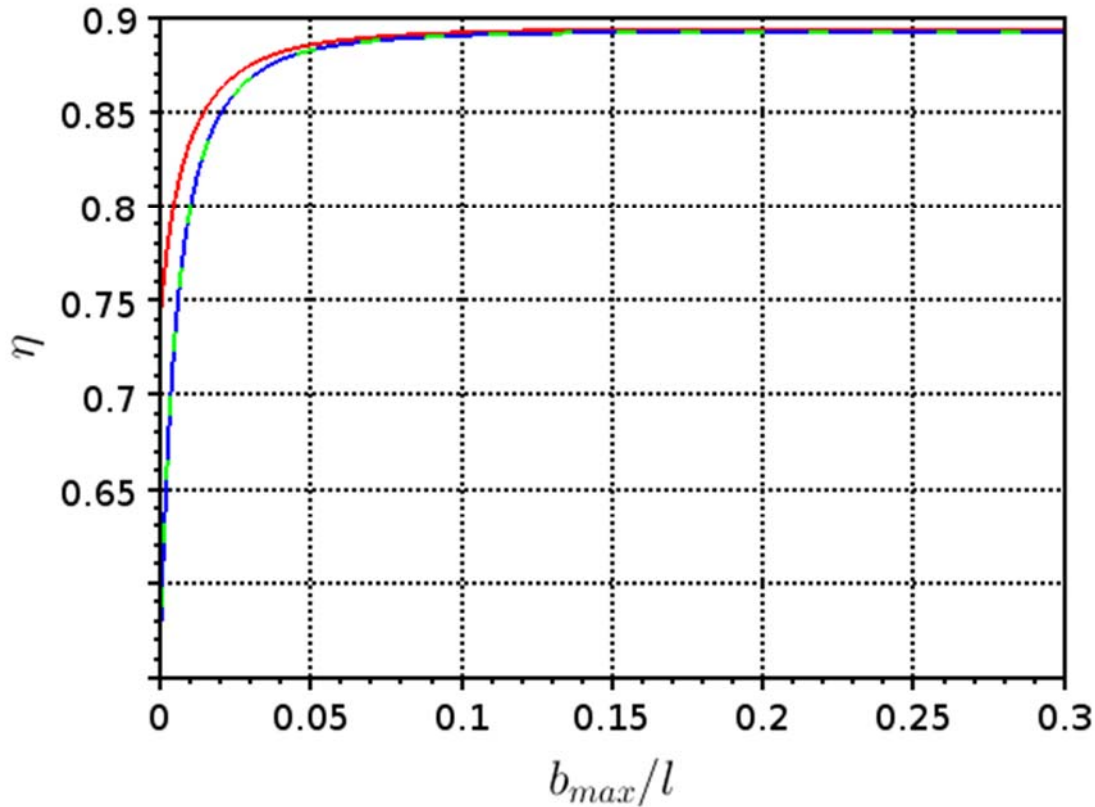


Рис. 4.1. Залежність ефективності вловлювання від максимально можливої висоти борта ванни:

червона суцільна лінія - при оптимальних значеннях чотирьох факторів;
 зелена суцільна лінія — при $Ar = 0$ і тих же значеннях трьох інших факторів; синя
 пунктирна лінія — після повторної оптимізації цих же трьох факторів при $Ar = 0$

Також отримано, що оптимальна загальна висота відсмоктувача дорівнює максимально допустимій.

Результати розрахунку надають можливість створити методику інженерного розрахунку відсмоктувача.

4.2 Методика розрахунку дворівневого повітряно-струминного екрану

При вирішенні прямої задачі розрахунку дворівневого повітряно-струминного екрану (рис. 4.2) промислових ванн необхідно такі вихідні дані:

1. Геометричні розміри ванни;
2. Температура води чи розчину у ванні;
3. Технологічні обмеження розмірів бортів ванни

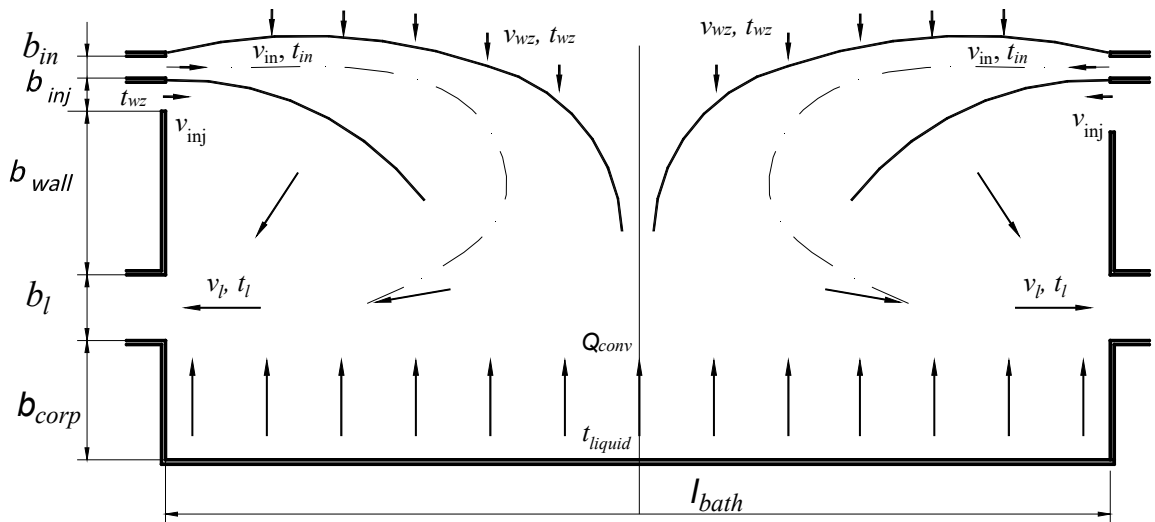


Рис. 4.2. Розрахункова схема двобортowego повітряно-струминного екрану

Метою розрахунку є визначення геометричних розмірів конструктивних елементів повітряно-струминного екрану, а також витрати та швидкості припливного та відсмоктувального повітря. За рекомендаціями технологічних карт, а також задля недопущення засмоктування рідини та утворення хвиль висоту влаштування щілин відсмоктування приймають згідно з методикою розрахунку класичного бортового відсмоктувача.

Методика розрахунку повітряно-струминного екрану за схемою зустрічних потоків та дворівневої схеми «приплив-відсмоктування» базується на рівності кількості руху повітря в результатному потоці та суми початкових кількостей

руху обох струмин з урахуванням взаємодії з конвективним потоком від нагрітої поверхні ванни.

На початку розрахунку перевіряється можливість використання дворівневих повітряно-струминних екранів при заданій тепловій напруженості гальванічних ванн, ширині та площі дзеркала рідини. Якщо конструкція повітряного екранування відповідає всім заданим умовам, то за розрахунком знаходять необхідні геометричні характеристики та витрати повітря.

Послідовність розрахунку:

1. Умови витікання припливної струмини повинні бути такими щоб система «струмина - відсмоктувач» була стійкою до зовнішніх взаємодій і не допускала витікання шкідливостей. При критерії Архімеда $Ar > 0,3$ відбувається процес дестабілізації струмини екрану гравітаційними силами. З рівняння (1.5) визначають мінімальну допустиму швидкість виходу струмини

$$v_{in} = 1,83 \sqrt{gl \frac{\Delta T_n}{T_e}}, \text{ м/с.}$$

2. Приймають рекомендоване [50, 103] обмеження ширини щілини припливу в межах 7...15 мм ($\delta = 0,007...0,015$ м).

3. Витрату на початку конвективного потоку визначають за дослідною формулою Ельтермана:

$$L_{conv} = 32,5 d_l^{5/3} Q^{1/3} / 3600, \text{ м}^2/\text{год} \quad (4.1)$$

де $d_l = 2 l b / (l + b)$ – еквівалентний діаметр ванни, м;

l – довжина ванни, м; b – ширина ванни, м; Q – надходження теплоти від ванни, Вт.

4. Витрату витяжного повітря визначають за залежністю $L_l = 1,2...1,3 L_{conv}$

5. Визначають ширину всмоктувальної щілини за рекомендованою [50, 70] швидкістю всмоктування $v_l = 2$ м/с, а саме

$$\delta_l = L_l / (3600 v_l) = L_l / 7200, \text{ м} \quad (4.2)$$

6. За технологічними даними задаються максимально можливою висотою бортів ванни B_{max} , м.
7. Максимальну сумарну висоту ежекційної щілини та газонепроникної стінки визначають як різницю

$$b_{max} = B_{max} - \delta - \delta_l, \text{ м.} \quad (4.3)$$

8. Відносну витрату припливного повітря визначають за умови, що витрата припливного повітря не може перевищувати витрату витяжного. При цьому враховано, що обидві витрати можна налаштувати лише з похибкою 20 %. Тому максимальне відносне відхилення відношення витрати становитиме $(0,2^2 + 0,2^2)^{1/2} = 0,29$. Отже, максимальне відношення витрат становить $1 - 0,29 = 0,71$. Оптимізація коефіцієнта ефективності за рівнянням регресії (3.35) результатів експериментів дає (рис. 4.3)

$$L_{in} / L_l = \min(0,359 + 9,85 (b_{max}/l), 0,71) . \quad (4.4)$$

9. Витрату припливного повітря визначають за залежністю

$$L_{in} = L_l / (L_{in}/L_l), \text{ м}^2/\text{ГОД} . \quad (4.5)$$

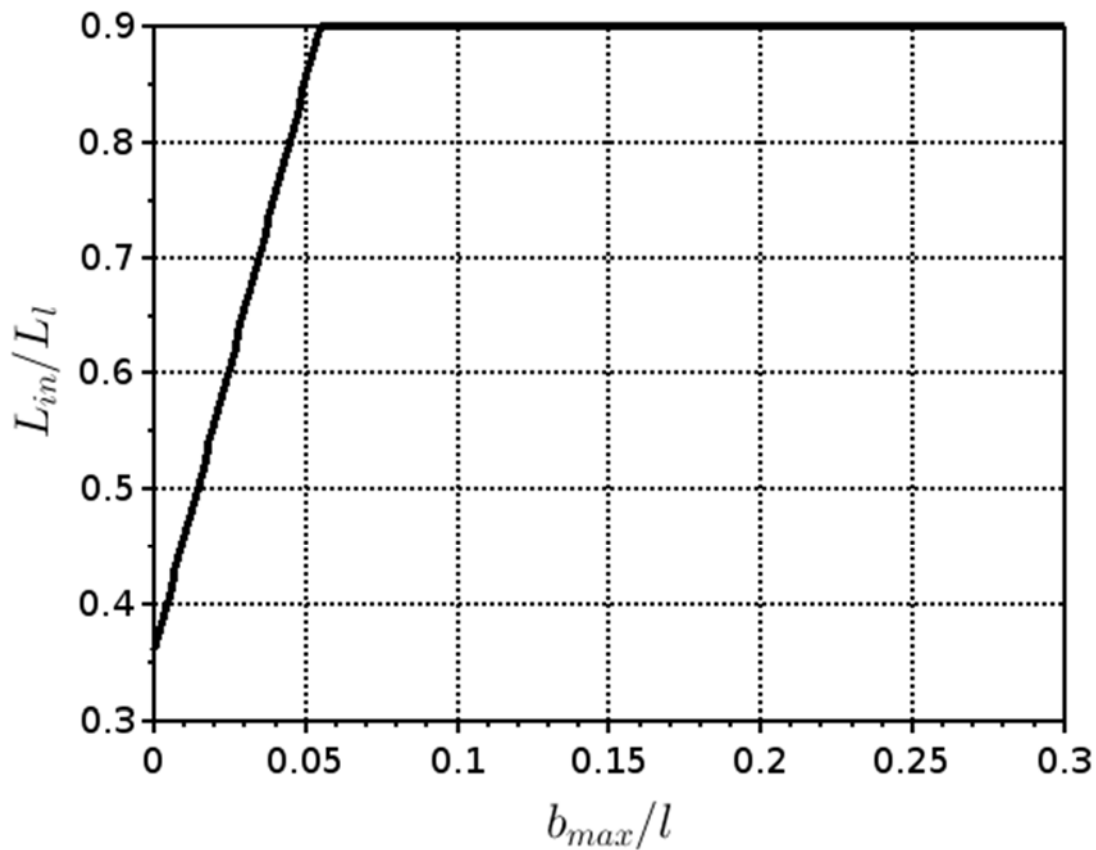


Рис. 4.3. Залежність співвідношень витрати припливного та відсмоктуваного повітря від максимально можливої сумарної висоти ежекційної щілини та газонепроникної стінки

10. Відносну висоту щілини для підсмоктування b_{inj} знаходять також за умови оптимальної ефективності (рис. 4.4)

$$b_{inj} / l = \max(0, 0,7561 (b_{max}/l) - 0,12731) \quad (4.6)$$

11. Висоту щілини знаходять за залежністю

$$b_{inj} = (b_{inj}/l) \cdot l \quad (4.7)$$

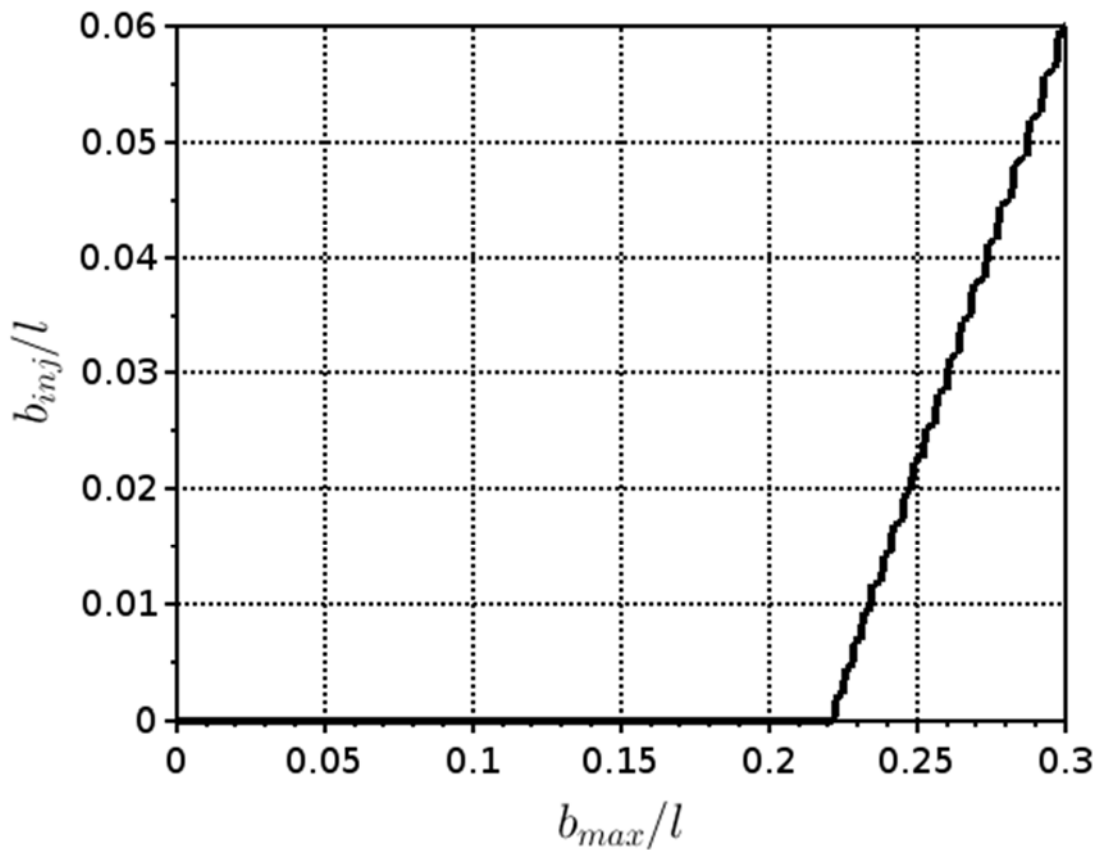


Рис. 4.4. Залежність висоти щілини підсмоктування від максимально можливої сумарної висоти ежекційної щілини та газонепроникної стінки

12. Оскільки підвищення загальної висоти відсмоктувача збільшує ефективність ловлення, то загальну висоту приймають максимальною b_{max} , м. Тоді відносну висоту газонепроникної стінки визначають як різницю (рис. 4.5)

$$b_{wall}/l = (b_{max}/l) - (b_{inj}/l) \quad . \quad (4.8)$$

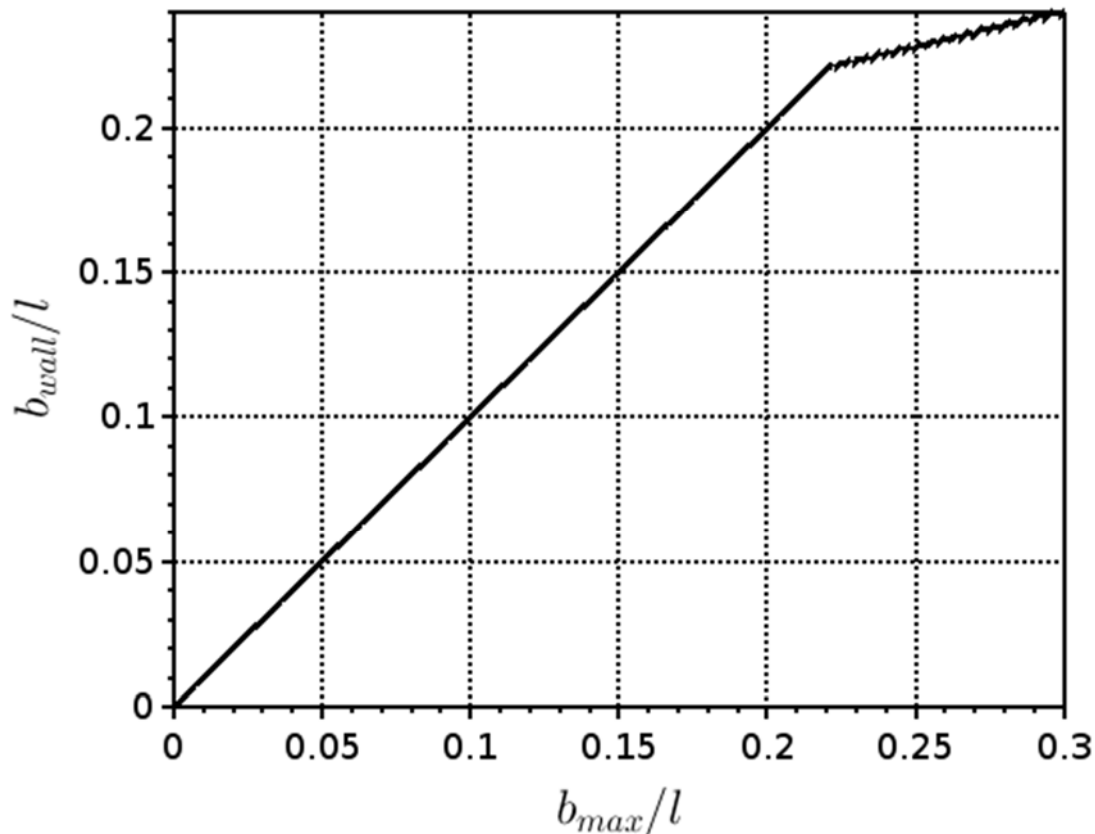


Рис. 4.5. Залежність висоти непроникної стінки борта ванни від максимально можливої сумарної висоти ежекційної щілини та газонепроникної стінки

13. Висоту газонепроникної стінки підраховують за залежністю
 $b_{wall} = (b_{wall}/l) \cdot l$;
14. Ширину щілини визначають за формулою $\delta = L_{in}/(3600 v_{in})$, м. Якщо ця ширина відповідає рекомендованому діапазону, то переходять до п. 17.
15. Якщо ширина більша за рекомендовану, то
- зменшують ширину щілини до максимальної рекомендованої $\delta = 0,015$ м;
 - перераховують швидкість виходу струмини $v_{in} = L_{in}/(3600 \delta)$, м/с;
 - якщо швидкість допустима для вентиляції, то переходять до п. 17
16. Якщо ширина менша за рекомендовану, то:

a. збільшують ширину щілини до мінімальної рекомендованої
 $\delta = 0,005$ м;

b. визначають витрату припливного повітря для забезпечення мінімального критерію Архімеда $Ar = 0,3$

$$L_{in} = 3600 v_{in} \delta;$$

c. визначають витрату витяжного повітря

$$L_l = L_{in} (L_{in}/L_l), \text{ м}^2/\text{год};$$

d. визначають ширину всмоктувальної щілини за формулою (4.2);

17. Визначають сумарну висоту ежекційної щілини та газонепроникної стінки за формулою (4.3)

18. Повторюють процес поки витрати та геометричні розміри не збігатимуться в межах 5...10 %.

19. Остаточо перераховують критерій Архімеда за формулою (1.5). Якщо він виявиться більшим за 0,3, то в розрахунках допущено помилку.

20. Визначають ефективність відсмоктування за рис. 4.6 або рівнянням регресії (3.35).

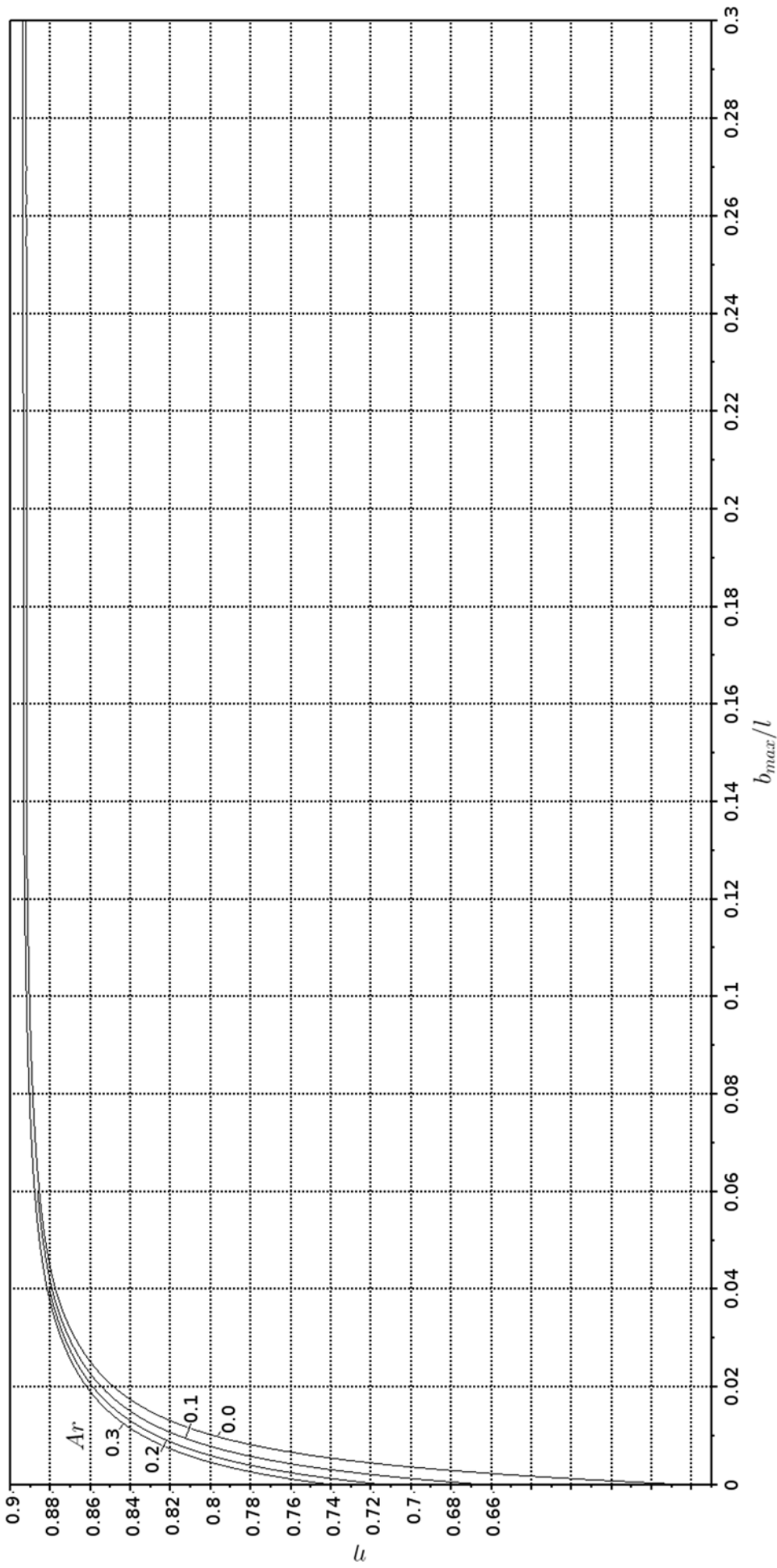


Рис. 4.6. Залежність ефективності вловлювання від максимально можливої сумарної висоти ежекційної щілини та газонепроникної стінки та критерію Архімеда

4.2. Розрахунок економічної ефективності від впровадження повітряно - струменевих екранів

Розрахунок ефективності застосування удосконаленого способу локалізації шкідливих виділень з поверхні ванни виконаний для ванни шириною 4 м. В якості базового рішення локалізації шкідливостей з поверхні рідини ванни прийнято місцеву систему вентиляції - однобортний відсмоктувач активований припливною струминою з протилежного боку ванни, що розраховувалась по різним методикам: Батуріна В.В., Посохіна В.Н., Гальчинського Я. А. [18, 50, 78]

Розрахунок виконаний для прикладу умов розглянутих в п. 4.2.

Термін служби, зростання продуктивності, супутні капітальні вкладення прийняті однаковими для порівнюваних варіантів, що порівнюються, різними є наведені витрата та річні експлуатаційні витрати споживача відповідно, базових і порівнюваного варіантів. У зв'язку з цим формула розрахунку річного економічного ефекту приведена до виду

$$\Pi = p_n K + (C_{ен} + C_{пос}) \quad (4.9)$$

де p_n – нормативний економічний коефіцієнт від капітальних вкладень;
 K – капітальні вкладення кожного з варіантів, грн визначаються за формулою

$$K = C_0 + K_{тр} + K_k, \quad (4.10)$$

де C_0 – витрати на придбання устаткування, грн;

$K_{тр}$ – витрати на транспортування, монтаж і наладку і-того устаткування приймається 15% від вартості, грн;

K_k – вартість робіт з облаштування комунікацій, приймається 10% від вартості, грн

$C_{ен}$ – змінна частина приведених експлуатаційних затрат, що виражається через енергію, грн/рік;

$C_{пос}$ – сумарна постійна частина приведених експлуатаційних «неенергетичних затрат», грн/рік

$$C_{ен} = k \cdot \Delta E_{вх} \cdot n, \quad (4.11)$$

де k – питомі затрати, що віднесені до корисного ефекту, грн/(кВт·год)

$$k = \frac{C_{ei}}{\eta_e} \quad (4.12)$$

C_{ei} – вартість одиниці витраченої енергії, яка становить 0,1936 грн/(кВт·год);
 n – кількість годин роботи апарата, год.

«Неенергетичні затрати» містять капіталовкладення, пов'язані з їх окупністю, затрати на амортизацію A , грн/рік; затрати на поточний ремонт $P_{п}$, грн/рік; затрати на заробітну плату Z , грн/рік; затрати на експлуатаційні матеріали $P_{м}$, грн/рік; інші затрати $P_{ін}$, грн/рік

$$C_{пос} = A + P_{п} + Z + P_{м} + P_{ін}, \quad (4.13)$$

де A – амортизаційні затрати, що складаються з суми відрахувань на капітальний ремонт і на відновлення пристроїв, грн/рік

$$A = 0,04 \cdot K, \quad (4.14)$$

$P_{п}$ – затрати на поточний ремонт і підтримування пристроїв в стані придатному для експлуатації, грн/рік

$$P_{п} = 0,02 \cdot K, \quad (4.15)$$

Z – затрати на заробітну плату експлуатаційного персоналу, грн/рік

$$Z = 1,3 \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (4.16)$$

де 1,3 – коефіцієнт, що враховує премії і додаткову заробітну плату;

$Z_{\text{осн}}$ – основна заробітна плата, що рівна добутку ефективного фонду часу на тарифну ставку грн/рік

$P_{\text{м}}$ – витрати на експлуатаційні матеріали та комплектуючі, грн/рік

$$P_{\text{м}}^{\text{I}} = 0,05(A + P_{\text{п}} + Z), \quad (4.17)$$

$P_{\text{ін}}$ - інші витрати приймаються в розмірі 1 % від суми капітальних вкладень, грн/рік

$$P_{\text{ін}} = 0,01 \cdot K, \quad (4.18)$$

Річна ефективність від впровадження дворівневого повітряно-струминного екрану наведена в табл. 4.1

Техніко-економічне порівняння

Табл. 4.1

Методика розрахунку (автор та посилання)	Об'ємна витрата повітря припливного повітря, м³/год	Об'ємна витрата повітря відсмоктування, м³/год	Встановлена потужність електродвигуна на вентиляторі припливу, кВт	Встановлена потужність електродвигуна на вентиляторі відсмоктування, кВт	Капітальні вкладення обладнання згідно, грн (4.10)	Амортизаційні затрати грн/рік, (4.14)	Затрати на поточний ремонт і підтримування пристроїв в стані придатному для експлуатації, грн/рік (4.15)	Затрати на заробітну плату експлуатаційного персоналу, грн/рік (4.16)	Інші витрати, грн/рік (4.17)	Сумарна постійна частина приведених експлуатаційних витрат, грн/рік	Приведені економічні затрати складають грн/рік
Батурин В.В. [2]	4711	28266	1,1	7,5	214000	8560	4280	179400	9612	415852	457752
Посохин В.Н. [50]	11042	46413	5,5	15	332000	13280	6640	179400	9966	541286	600886
Гальчинский Я.А. [4]	3157	21542	0,9	7,5	202000	8080	4040	179400	9576	403096	443196
Автор	2180	17218	0,3	5,5	198000	7920	3960	179400	9564	398844	438344

Як видно з Табл. 4.1. приведені затрати дворівневим повітряно-струминним екраном в порівнянні з іншими системами локалізації майже однакові, а ефективність є більшою.

4.3 Висновки до розділу 4

1. На підставі техніко-економічних розрахунків обґрунтовано застосування дворівневих повітряно-струминних екранів у системах вентиляції промислових будівель. Заощадження приведених економічних затрат в середньому становить 12,8% у порівнянні з діючими системами вентиляції.
2. Показано доцільність використання дворівневого повітряно-струминного екрану великогабаритних ванн у різних галузях промисловості, що підтверджує широкі можливості впровадження повітряного екранування.
3. Наукова робота також має і соціальні наслідки, оскільки використання результатів досліджень призводить до покращення умов праці в робочій зоні промислових приміщень і зменшення впливу технологічних процесів на навколишнє середовище.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

4. 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.
5. Розроблено напрямок збільшення ефективності роботи системи місцевої вентиляції для промислових ванн зі значними поверхнями випаровування.
6. 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.
7. 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.
8. Розроблено та захищено патентом України енергоефективна конструкція дворівневих повітряно-струминних екранів з обертовими потоками, що використовують взаємодію співвісних зустрічних струмин.
9. 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, БМК

«Енергомонтажвентиляція» м. Київ та «Відокремлений підрозділ "Лубенський верстатобудівний завод "АТ "МОТОР СІЧ"»).

10. Техніко-економічні розрахунки дозволяють констатувати можливість заощадження енергії на переміщення повітря при використанні дворівневих повітряно-струминних екранів та заощадження капітальних вкладень у порівнянні з діючими системами вентиляції.

Список використаної літератури

1. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 № 1264-ХІІ. Дата оновлення: 01.01.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12/ed20210101#Text> (дата звернення: 03.02.2021).
2. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств. М. Химия. 1980. - 288 с.
3. Справочник гальваностега. Бахвалов Г. Т., Биркган Л. Н., Лабутин В. Н. М., Чермег, 1948, 511 с.
4. Абрамович Г. Н., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н. Турбулентные течения при воздействии объемных сил и неавтомадельности. -М., Машиностроение, 1975, 93 с.
5. Авторское свидетельство СССР № 623063, опубликованное 0,5.0,9.1978, Бюллетень № 33
6. Авторское свидетельство СССР № 825691, опубликованное 30.04.1981, Бюллетень № 16.
7. Авторское свидетельство СССР № 360521, опубликованное 21.02.1972, Бюллетень № 8.
8. Акобджанян А. С. Расчет оптимальной перфорации. / В сб.: «Машиностроение для текстильной промышленности». - М., ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1971, №6, с. 6-8.
9. Бай Ши-И. Теория струй. М.: Физматиз. 1960. -326с.
10. Алтынова А. Л. Изменение осевой скорости во всасывающем факеле у эллиптического отверстия в плоской стенке. / Водоснабжение и санитарная техника/ -М, 1974, №5, с. 26 - 28.

11. Астафьев В. И. Построение потоков, создаваемых односторонними бортовыми отсосами травильных ванн. /В кн.: Сб. научных трудов строительного института Московского Совета. -М.,1948, Вып. 2, с. 125-141.
12. Бошняков Е. М. Расчет аспирационных воздухообменов и проектирование местной вытяжной вентиляции производств порошкообразных материалов. // Водоснабжение и санитарная техника. - 1969,- №6. -С.31 - 34.
13. Бошняков Е. Н. Проектирование и расчет комбинированных местных отсосов// Водоснабжение и санитарная техника. -1975. -№3 -С. 11-13.
14. Бруязкий Е. В. Плоская турбулентная струя в неоднородном сносящем потоке. /В кн. Механика турбулентных потоков. -М.: Наука, 1980. -С. 272-279.
15. Баранов М. М. Основные положения к проектированию бортовых отсосов от промышленных ванн с вредными выделениями. / В кн. Проектирование отопительно-вентиляционных систем промышленных предприятий /Техн. информация. -М., 1962, №6, с. 1-18.
16. Гилязов Д. К. Расчет взаимодействия конвективной струи и отсоса// Изв. вузов., -1974. - №9. - С. 122.
17. Гримитлин М. И. Распределение воздуха в помещениях. -СПб.: 1994. – 316 с.
18. Батурин В.В., Лопатина В.С. Передувки. / Отопление и вентиляция, - М. 1941, №1. с. 1-4
19. Елинский И. И. Вентиляция и отопление гальванических и травильных цехов машиностроительных заводов. М.:1982. -135с.
20. Зиньковский А. К. Закономерности сложения скоростей взаимодействующих потоков// Изв. вузов. - 1977,- №4. - С.78-84.
21. Иваницкая М. Ю. Локализирующие установки компенсационного типа/ Современные направления развития промышленной вентиляции. Семинар. - М.: МДНТП. 1986.-С.28-30.

22. Иванов Ю. А. Исследование кольцевых воздушно-струйных ограждений источников вредностей и рабочих зон. Автореферат, канд. дисс. Киев. 1984. -23с.90
23. Исследование центрального отсоса от ванн электролитического рафинирования. // Научные работы ИОТ ВЦСПС. -1972. -№ 75,- С.33-35.
24. Бройда В. А. Местные отсосы, активированные приточными струями. /Изв. Вузов. //Строительство и архитектура. -М., 1978, №3, с. 90-95.
25. Бройда В. А., Посохин В. Н. Плоская струя в поле действия щелевого отсоса. /Изв. Вузов//Строительство и архитектура. -М., 1976, №4, с. 116-120.
26. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука. 1970. 104с.
27. Бромлей М. Ф. Структура воздушного потока в зоне действия всасывающих отверстий. / Отопление и вентиляция. -М. 1939, №3, с. 37-44.
28. Ковшов В. Н. Постановка инженерного эксперимента. -Киев.: Высшая школа. 1982.-120с.
29. Коростылев Ю. А. Исследование аэродинамических боковых местных отсосов от газовых и конвективных источников: Автореферат канд. дисс.: Новосибирск. 1975,-С.23
30. Виварелли И. Л. Бортовые отсосы от промышленных ванн. / вып. 17. //Литография -М. Промстройпроект, ЦНИЛОВ, 1939, 138 с.
31. Крашенинников С. Ю., Яковлевский О. В. Распространение турбулентной струи, соударяющейся с плоской поверхностью// Известия АН СССР. -1966. №4. С.57.
32. . Кузьмин М. С. Теория и расчет локализирующих струйных ограждений источников технологических вредных выделений// Водоснабжение и санитарная техника. -1974. - №12. -С.22-27.

33. Кузьмин М. С., Поляков Е.И. Воздушно-струйные ограждения источников вредных выделений// Гигиена труда и профессиональные заболевания. -1974. -№7. -С.28-30.91.
34. Кузьмина Л. В. Боковые отсосы, активированные поддувом воздуха// Научные работы ИОТ ВЦСПС. -1959. -№4. -С.11-15.
35. Кузьмина Л. В. Метод расчета боковых отсосов от горячего оборудования// Научные работы ИОТ ВЦСПС, - 1964. №2. -С.9-13.
36. Кузьмина Л. В. Эффективность бокового отсоса при подаче в зону всасывания компенсационного воздуха/ Промышленная вентиляция и охрана окружающей среды. М: ВЦНИИОТ ВЦСПС. 1978. - С. 104 - 110.
37. Кучушев П. А., Калисаров Я. Н. Местные отсосы при сварочных работах на кондукторах электродами с рутиловой обмазкой. В кн. "Местная вытяжная вентиляция" М. МДНТП. -1969. -С. 79-83.
38. Лаврик В. И., Савенков В. Н. Справочник по конформным отображениям. Киев. 1970.-252с.
39. Методические рекомендации по расчету местных отсосов, встроенных в новое технологическое оборудование. Л.: ВЦНИИОТ. 1987,- С. 50/
40. Методические указания по конструированию местных воздухоприемников, встроенных в оборудование для пайки и лужения. Л.: ВЦНИИОТ. 1980. - С.27
41. Милн-Томсон Л. М. Теоретическая гидродинамика, - М.: Мир. 1964,- 655 с.
42. Морев М. А. Расчет на ЭВМ воздушно струйного укрытия местного отсоса щелевого типа// Материалы 51-ой научно-технической конференции ВГАСА. Воронеж. 1998- С.66-68.
43. Налимов В. В. Теория эксперимента. - М. Наука. 1970. -208с.
44. Гуревич М. И. Теория струй идеальной жидкости. М., Наука, 1979, 536 с.

45. Павлинова И. Б. К вопросу о вентиляционных воздушно-струйных укрытиях // Санитарная техника. Киев. -1969,- №VIII. -С.21-23.
46. Павлинова И. Б. Исследование воздушноструйного укрытия над источником вредных выделений// Отопление и вентиляция жилых, общественных зданий. -1967. №23. С. 44-49.
47. Партыновский А. Э. Экспериментальное исследование кольцевого наддува// Водоснабжение и санитарная техника .-1979- №1,- С. 19-21.
48. Позин Г. М., Посохин В. Н. Метод расчета полей скоростей, образуемых щелевыми отсосами в ограниченном пространстве/ Безопасность и гигиена труда. Сб. научн. работ институтов охраны труда ВЦСПС.М.: Профиздат, - 1980. - С.52-57.93
49. Поляков Е. И., Кузьмин М. С. Экспериментальное исследование струйной защиты пылегазовыделяющего металлургического оборудования// Охрана труда и техника безопасности в черной металлургии. - 1973. - №2. -С.56.
50. Посохин В. Н. Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования. М. 1984. - 160 с.
51. Посохин В. Н., Бройда В. А. Методика расчета активированных отсосов// Водоснабжение и санитарная техника. -1979. - №5. -С.12-15.
52. Посохин В. Н., Подольская М. В. К расчету течения, образующегося при взаимодействии струи и отсоса//Местные отсосы в текстильной промышленности. Тезисы докладов. М. -1972. - С.61
53. Рекомендации по расчету систем вентиляции и кондиционирования воздуха в горячих цехах предприятий общественного питания. Разработка ЦНИИЭП инженерного оборудования. М.: Стройиздат 1975. -С. 108.
54. Ромейко Н. Т. Локализация вредностей у проемов технологического оборудования. Автореферат канд.дисс. Л.- 1980. -23 с.
55. Ромейко Н. Ф. Эффективность работы четырех типов локализирующих воздушных завес/ Отопление и вентиляция. Межвузовский сборник научных трудов. Куйбышев. -1984. -С. 63-70.

56. Ромейко Н. Ф., Сыромятникова Н.Е. Исследования воздушных завес на модели. / Отопление и вентиляция. Межвузовский сборник научных трудов. Куйбышев. -1984. -С. 70-76.
57. Колмогоров А. Н. Рассеяние энергии при локальной изотропной турбулентности. /Докл. АН. СССР, -М., 1941, XXXI1, с. 1264-1273
58. Ромейко Н. Ф., Щибраев Е. В. Влияние соотношения количества движения взаимодействующих потоков на коэффициент расхода воздуха через проем/ В кн. Исследования в области отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Л. -1977. №2 (137). -С. 24-28.94
59. Ромейко Н. Ф., Щибраев Е. В. Защита печных проемов воздушными струями/ В кн.: Теплофизика и оптимизация тепловых процессов. Вып. 4. Куйбышев. -1978,- С.47-51.
60. Ромейко Н. Ф., Щибраев Е. В. Локализация газовых вредностей у оборудования с внутренним избыточным давлением воздушными струями// Водоснабжение и санитарная техника. -1980. -№8. -С.8-11.
61. Кочин Н. Е., Кибель И. А. Розе Н. В. Техническая гидромеханика. -М. Физматгиз, ч.11, 1963,727 с.
62. Савельев Ю. Л., Столер В. Д. Результаты исследования локализирующей способности передувов над травильными ваннами/ Очистка вентиляционных выбросов и защита воздушного бассейна от загрязнения. Тезисы докладов. Ростов-на-Дону. -1977. -С.41-43.
63. Сазонов Э. В. Теоретические основы вентиляции. Воронеж. 1990. - 207с.
64. Сазонов Э. В., Черниговская Л. Н., Морев М. А. Оптимизация работы воздушно-струйных укрытий// Деп. во ВНИИТПИ. -1995. - Вып.1 №11511. -С.2.
65. Сазонов Э. В., Токмаков В. Ф. Аспирационное укрытие с воздушной завесой/ Вопросы совершенствования монтажных наладочных и проектных работ по отоплению, вентиляции и кондиционированию воздуха. Новосибирск. - 1975. С.70-72.

66. Дерюгин Б.В. Методика моделирования стационарных тепловых и аэродинамических процессов при решении задач вентиляции. // Исследования в области отопления. Вентиляции и кондиционирования воздуха. - Л.: Изд-во ЛИСИ, 1975. - Вып. 110.-С.34-48.
67. Серкин В. Т. Расчет и конструирование вытяжных зонтов-козырьков //Водоснабжение и санитарная техника. - 1979. - № 11. -С.41.
68. Смирнов А. Ф. К расчету укрытий электролизеров с обожженными анодами// Исследования в области отопления, вентиляции, теплоснабжения и кондиционирования воздуха. Межвузовский тематический сборник научных трудов. Л.-1980. - С.45-48
69. Сорокин Н. С., Талиев В.Н. Аспирация машин и транспорта текстильной промышленности. М. 1978. - 216с .
70. Справочник проектировщика. Вентиляция и кондиционирование воздуха/Под. ред. Староверова И. Г. 2-е изд. М. Стройиздат. 1977. -502с.
71. Столер В. Д., Савельев Ю. Л. Критерии эффективности локализирующих свойств воздушно-струйных укрытий// Известия вузов.-1979. -№3 -С.90-95.
72. Столер В. Д., Савельев Ю. Л. Расчет передувов над травильными ваннами// Проектирование отопительно-вентиляционных систем и систем водоснабжения и канализации. Вып. 8 (124). М. ЦНИИС Госстроя СССР. 1977.- С.3-11.
73. Сухарев В. А. Исследование кольцевых отсосов от круглых ванн и печей. Автореферат канд. дисс. Киев. 1979. -24с.юз. Сухарев В.Л. К вопросу расчета нижних отсосов// Известия вузов. -1976. -№8. -С.31-34.96
74. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. -М. Наука, 1965, ч. 1,2, 723 е. 861с.
75. Гиль Б. Л. О применении метода конечных разностей при решении задачи диффузии во всасывающем потоке // Тепломассообмен в отопительно-вентиляционных устройствах: Межвуз. сб. Казань: КХТИ, 1987,- С.85-97.

76. Тимофеева О. Н. Струйно-воздушное укрытие для локализации источников вредностей //Научные работы ИОТ ВЦСПС. -1959. - №2. -С.19-22
77. Николаев В. И. Исследования и разработка местного отсоса от ванн машин химических волокон /автореферат дис. к.т.н., -Л., ВНИИОТ, 1982,24 с.
78. Гальчинский Я.А. К расчету плоских передувов. – В кн.: Вентиляция в металлургической промышленности. – М.: Металлургия, 1968. – с. 98-103.
79. Фукс Б. А., Шабат Б. В. Функции комплексного переменного и некоторые их приложения. -М. Физматгиз. 1959.- 376с
80. Хартман К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. -М. Мир. 1977,- 252с.
81. Щанкин В. Д. Эффективность локализующей вентиляции/ Исследования в области отопления, теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха. Межвуз. сб. научн. трудов. Л. -1980. - С. 80-85
82. Павлинова И. Б. Воздушно-струйные укрытия источников вредных выделений /В кн. Местная вытяжная вентиляция. //Материалы семинара. -М. МДНТП, 1969, с. 56-63
83. Ахмадеев Р. Х., Гуревич И. Л., Посохин В. Н. К расчету щелевых отсосов от осесимметричных диффузионных источников // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1990. - С.78-83.
84. Патент США, кл. 264-176, Ф. №3705227, 1972
85. Талиев В. И. Всасывающий факел у щели между двумя параллельными стенками // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1970. - №5. - С. 101-104.
86. Талиев В. Н. Всасывающий факел у щели в плоской стенке // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1971. -№3. - С. 124-127.
87. Талиев В. Н., Шулекина Е. И. Изменение скорости во всасывающем факеле у бесконечно-длинной щели // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1969. - №10.

88. Шулекина Е. И. Изменение осевой скорости воздуха в зоне действия стесненной всасывающей струи // Водоснабжение и санитарная техника. 1970. - №1. - С.31-32
89. Полушкин В. И. Универсальная интегральная характеристика турбулентных струй. /Известия вузов /Технология текстильной промышленности. -Иваново, 1980, №4, с. 66-69
90. Шулекина Е. И. Аэродинамика плоских всасывающих факелов: Дис. . канд. техн. наук. М., 1970. - 165с.
91. Талиев В. Н., Александров Л.Р. Всасывающий факел у продольной щели постоянной ширины по трубе круглого сечения // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1990. - №4. - С.76-78.
92. Посохин В. Н., Живов А. М. Расчет очертаний отрывных зон в потоках вблизи всасывающих отверстий // Гидромеханика отопительно-вентиляционных устройств: Межвуз. сб. науч. тр. Казань: КГ АСА, 1997. - С.57-65.
93. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. -М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы. 1960. -715 с.
94. Ткачук А. Я., Корбут В. П., Довгалюк В. Б., Дубровский Б. И. Совершенствование систем организации воздухообмена в машинном отделении АЭС с ВВЭР-1000 // Электрические станции.– М., 1987. – № 1. – С. 13-17.
95. Корбут В. П., Давиденко Б. В. Особливості числового моделювання аеродинаміки та температурного стану приміщень з теплонадходженнями // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. – Вип. 1.– К.: КНУБА, 2001. – С.16-34.
96. Рекомендации по вопросу воздушно-струйных ограждений источников вредных выделений. /Сер. АЗ-764. -М. ГНИ Сантехпроект, 1977, 37 с.
97. Рейнольдс А. Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях. -М., Энергия, 1979,408 с.

98. Вулис Л. А. О турбулентном смешении свободных газов струй // Турбулентные течения. – М.: Наука, 1970. – С.133-138.
99. Сакипов З. Б. Темирбаева Д. Е. Перенос импульса и тепла в свободной турбулентной струе./В кн. Прикладная теплофизика. -Алма-Ата, Вып.1, с. 47-73
100. Корбут В. П. Конвективные потоки от нагретых поверхностей и их взаимодействие // Изв. вузов. – №3, 1975. – С. 128-134 (Строительство и архитектура).
101. Корбут В. П. Природна турбулентна конвекція між вертикальними тепловіддавальними поверхнями. – К.: Наукова думка, 1996. – 216 с.: іл.
102. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – изд. 5-е, перераб. – М.: гл. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1978. – 736 с.
103. Бутаков С. Е. Аэродинамика систем промышленной вентиляции. - М.: Профиздат, 1949. – 269 С. 98.
104. Prandtl L. Bemerkung zur Theorie der freien Turbulenz // ZAMM. – Band 22. – Heft 5, 1942.–S.241-243.
105. Taylor G.J. The transport of vorticity and heat through fluids in turbulent motion // Proc. Of Royal Soc. Series A. – v. V. – CXXXV. – # 828, 1932. – P. 485-488.
106. Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции. -М, Стройиздат, 1979, 295 с.
107. Мілейковський В. О. Закономірності підтікання повітря до струмини // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. – Вип. 5. – К.: КНУБА, 2002. – 128с. – С. 22–25.
108. Versteeg Н.К., Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method. – N.Y.: Longman Scientific & Technical, 1995.– 257 p.
109. J.D.Anderson, Jr. Computational Fluid Dynamics. The Basis with Applications. – N.Y.: McGraw-Hill, Inc., 1995.– 547 p.

110. Бурцев С. И., Денисихина, Д. М. Математическое моделирование процессов турбулентного переноса в профессиональной практике техники вентиляции и кондиционирования воздуха / АВОК №5, 2006. – С. 40-49

111. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / Алямовский А. А.; Собачкин А. А.; Одинцов Е. В. и др. – СПб.: БХВ–Петербург, 2005. – 80 с.

112. Указания по расчету приточных воздухораспределительных устройств. -М, Серия АЗ-358, Сантехпроект, 1968, 65 с.

113. Котельников Р. Б. Анализ результатов наблюдений. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.

114. Возняк О. Т., Желих В. М. Основи наукових досліджень у будівництві: Навч. посібник для студ. вищих навч. закл. / Національний ун-т "Львівська політехніка". – Л.: Видавництво Національного ун-ту "Львівська політехніка", 2003. — 176 с.

115. Зайцев Олег Миколайович. Інтенсифікація процесів взаємодії оберткових потоків в енергозберігаючих технологіях теплоенергетики: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.14.06 / Одеський національний політехнічний ун-т. – О., 2004. – 35 с.

116. Федоровский П.Е., Красилов Г.И. Расчет бортовых отсосов от ванн. /В сб. Современные вопросы вентиляции. -М., Стройиздат, 1941, 140 с.

117. Зайцев Олег Миколайович. Удосконалення процесів вилучення шкідливостей закрученими потоками від нефіксованих теплових джерел: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.04 / Одеський держ. політехнічний ун-т. – О., 1996. – 16с.

118. Фиалковская Т.А. Существующие методы расчета местных отсосов. /В кн. Местная вытяжная вентиляция. -М. МДНТП, 1969, с. 922.

119. 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.

120. 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

121. 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. Cassootherm 2016

122. Корбут В. П., Рибачов С. Г. Експериментальні дослідження дворівневого повітряно-струминного огороження відкритої поверхні промислових ванн великих розмірів. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Науково-технічний збірник КНУБА, К.:2021 №36, с. 6-14

123. 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

124. ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювання та загальні вимоги Наказ від 30.12.2009 р. № 486 "Про прийняття міждержавних стандартів як національних, скасування чинності національних стандартів та внесення змін до наказу Держспоживстандарту від 03.10.2007 № 245"

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

126. Шепелев И. А. Расчет прямоугольных воздуховодов равномерной раздачи по методу инж. К.К. Баулина /Отопление и вентиляция -М. 1938, №4, с. 67-74

127. Шепелев И. А. Воздушные потоки вблизи всасывающих отверстий // Тр. НИИсантехники. М., 1967. - №24. - С. 190-209.

128. Шепелев И. А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. -М.: Стройиздат, 1978. 144с.

129. Посохин В. Н. О спектрах всасывания // Теплогазоснабжение и вентиляция: Тез. докл. Киев: Будивельник, 1969. - С.127-129.

130. Талиев В. Н. Изменение осевой скорости со всасывающем факеле у прямоугольного отверстия // Всесоюзная межвузовская конференция по проблемам охраны труда: Тез. докл. Иваново, 1969. - С. 168-170.

131. Талиев В. Н. Всасывающий факел у прямоугольного отверстия // Водоснабжение и санитарная техника. 1970. - №7. - С.14-16.

132. Куница В. И. Аэродинамика потока вблизи круглого вытяжного отверстия// Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха в промышленных зданиях: Тр. ЦНИИпромзданий, 1971. вып. 19. -С.47-52.

133. Куница В. И. Спектр всасывания вблизи круглого отверстия // Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха в промышленных зданиях: Тр. ЦНИИпромзданий, 1972. вып.26. - С.111-118.

134. Тягло И. Г., Шепелев И. А. Сток жидкости к прямоугольному отверстию // Теплогазоснабжение и вентиляция: Тез. докл. Киев: Бу-дiвельник, 1969. - С. 169-171.

135. Лифшиц Т. Д. Исследование закономерности изменения скорости на оси потока, создаваемого круглым всасывающим отверстием с острой кромкой // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1973. -№7. - С.153-154.

136. Лифшиц Т. Д. Исследование поля скоростей во всасывающем факеле круглой полубесконечной трубы // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1974. - №10. - С. 114-119.

137. Лифшиц Г. Д. К вопросу исследования закономерностей всасывающих факелов // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1975.- №12. С.135-141.

138. Лифшиц Т. Д. Исследование вытяжных факелов местных отсосов методом «особенностей» // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1977. - №4. - С. 104-108.

139. Логачев К. И. Аэродинамика всасывающих факелов. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2000. - 175с.

140. Flinn M.R., Miller C.T. The Boundary integral equation method (BIEM) for modeling local exhaust hood flow fields Am. Ind. Hyg. Assoc. I. 50(5), 1989. - P.281-288.

141. Conrqi L.M., Lilenbekker M.I., Fiinn M.R. Prediction and measurement of velocity into flanged slot hoods Am. Ind. Hyg. Assoc. I. 49(5), 1988. - P.226-234.

142. Flinn M.R., Miller C.T. Comparison of models for flow through flanged and plain circular hoods- An. OCCNP. Hyg., Vol 32, №3, 1988. P.373-384.

143. Кобышев И.И., Чесноков А.Г., Щадрова С.Н. Расчет некоторых пространственных всасывающих факелов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1976. -№4. - С.82-85.

144. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973. -758с.

145. Ахмадеев Р. Х., Посохин В. Н. Расчет отсосов от витринных укрытий источников диффузионного типа // Гидромеханика отопительно-вентиляционных устройств: Межвуз. сб. Казань: КИСИ, 1991. -с.21-29.

146. Астафьев В. М. Построение потоков, создаваемых односторонними бортовыми отсосами травильных ванн // Сб. трудов строительного института Моссовета, 1948. вып.2. - С. 125-141.

147. Маховер В. Л., Халезов Л.С., Чесноков А. Г. Всасывающий факел у щелевидных отверстий // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1969. -№1. - СД43-147.

148. Маховер В. Л., Халезов Л. С., Чесноков А. Г. К теории всасывающего факела у щелевидных отверстий // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1969. -№3. - С. 123-128.

149. Халезов Л. С., Чесноков А. Г., Маховер В. Л. Аэродинамика боковых всасывающих отверстий // Всесоюзная межвузовская конференция по проблемам охраны труда: Тез. докл. Иваново, 1969. - С. 172-175.

150. Лыков А. В. Теория теплопроводности Учебное пособие. — М.: Высшая школа, 1967. — 600 с.: ил.

ДОДАТКИ

