

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

САВІН ВАЛЕРІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 697.921.2:628.8

ДИСЕРТАЦІЯ

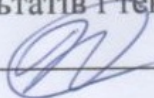
**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ПІДТРИМАННЯ ПАРАМЕТРІВ
МІКРОКЛІМАТУ В ЕНЕРГООЩАДНИХ БУДИНКАХ З ПАСИВНОЮ
ВЕНТИЛЯЦІЄЮ**

Спеціальність: 192 – Будівництво та цивільна інженерія

Галузь знань: 19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 В.В. Савін

Науковий керівник – Кіріченко Павло Сергійович, кандидат технічних наук, доцент

Кривий Ріг – 2025

АНОТАЦІЯ

Савін В.В. Підвищення ефективності системи підтримання параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках з пасивною вентиляцією. - Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» - Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2025.

Дисертаційна праця є закінченим науковим дослідженням, у якому вирішено актуальне наукове завдання, що має важливе практичне значення щодо підвищення ефективності функціонування пасивних систем вентиляції для енергоощадних будинків за рахунок впровадження вітровловлювачів.

Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування системи підтримання параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках із пасивною вентиляцією шляхом впровадження вітровловлювачів, із урахуванням їхніх гідродинамічних характеристик, конструктивних параметрів та впливу кліматичних умов.

Об'єктом дослідження є процеси формування повітрообміну в енергоощадних будинках під дією природних аеродинамічних сил у пасивних системах вентиляції із застосуванням вітровловлювача.

Предметом дослідження є гідродинамічні характеристики вітровловлювача, зокрема повітросприймання залежно від напрямку та швидкості повітряного потоку, втрати тиску на окремих ділянках системи, а також аеродинамічні та енергетичні характеристики пасивної системи вентиляції, що впливають на її ефективність.

Наукова новизна одержаних результатів характеризується наступним:

– уперше розроблено комп'ютерні моделі процесу повітровловлювання в широкому діапазоні швидкостей вітрового потоку, що дало можливість зробити

оцінку гідродинамічних характеристик запропонованої конструкції вітровловлювача;

- уперше створено комп'ютерну модель системи пасивної вентиляції із застосуванням вітровловлювача, що дало змогу провести імітаційне моделювання організації повітрообміну та стратифікації параметрів мікроклімату в приміщенні енергоощадного будинку для різних кліматичних умов;

- уперше виконано оцінку впливу вітрового напору із врахуванням його сезонності для міста Кривий Ріг на продуктивність повітрозабору вітровловлювачем. Встановлено, що коефіцієнт корисної дії вітровловлювача знаходиться в межах від 86,1 до 94,4%;

- удосконалено узагальнену методику інженерного розрахунку пасивних систем вентиляції з вітровловлювачем на основі фізичного та комп'ютерного моделювання, що зробило можливим урахувати реальні умови експлуатації при визначенні необхідного повітрообміну в приміщеннях;

- подальшого розвитку набули підходи до комплексної оцінки ефективності роботи пасивних систем вентиляції енергоощадних будинків із застосуванням вітровловлювачів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- розроблено методику інженерного розрахунку пасивної системи вентиляції із вітровловлювачем, яка дозволяє визначати гідродинамічні характеристики і розрахункову витрату повітряного потоку до приміщення залежно від геометричних та аеродинамічних характеристик системи, а також зменшити похибку при розрахунках і підвищити точність проектних рішень;

- запропоновано узагальнений алгоритм визначення ефективності роботи пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем, який відображає загальний порядок дій, необхідний для оцінювання її функціонування відповідно до встановлених мікрокліматичних вимог;

- отримані результати чисельного та фізичного моделювання можуть бути використані для створення програмного забезпечення або відповідних модулів у

системах автоматизованого проектування, що забезпечить автоматизацію інженерних розрахунків пасивних вентиляційних систем із використанням вітровловлювачів;

- проведене оцінювання економічної доцільності системи вентиляції з вітровловлювачем у реальних експлуатаційних умовах дає змогу використовувати ці рішення при реконструкції наявних будівель або при проектуванні нових енергоощадних об'єктів без застосування механічної вентиляції;

- розроблено фізичну модель вітровловлювача для пасивної системи вентиляції енергоощадної будівлі, яка в результаті має і соціальні наслідки, оскільки сприяє покращенню санітарно-гігієнічних умов в приміщеннях, і термін окупності в межах 2 – 4 роки залежно від обсягу вентиляційного навантаження, кліматичних умов регіону, типу будівлі та рівня інтеграції з іншими енергоефективними рішеннями (наприклад, рекуперацією тепла або сонячними колекторами);

- отримані результати створюють науково-технічне підґрунтя для розробки нових конструкцій вітровловлювачів, здатних ефективно вловлювати повітряні потоки зменшуючи енерговитрати на вентиляцію.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у ТОВ «Кривбаспроект» при модернізації системи припливної вентиляції адміністративного блоку з метою підвищення енергоефективності системи підтримання параметрів мікроклімату, у виробничу і проєктну діяльність на ТОВ «Трубний завод Славсант» та ПП «АІТ ЕНЕРГО».

У першому розділі представлено аналіз сучасних енергоощадних будівельних технологій та систем підтримання параметрів мікроклімату, що охоплює передусім вентиляційні рішення. Встановлено, що механічні системи вентиляції забезпечують стабільний повітрообмін, проте характеризуються значними енергетичними витратами. Виявлено, що пасивні вентиляційні рішення, зокрема з вітровловлювачем, здатні ефективно знижувати рівень енергоспоживання, забезпечуючи при цьому належний мікроклімат у приміщеннях. Зазначено, що в

Україні активно впроваджуються міжнародні стандарти енергоефективності, однак вони ще потребують удосконалення, зокрема в частині застосування пасивних вентиляційних технологій. Окрім того, відзначено, що хоча початкові витрати на впровадження енергоощадних систем вищі, вони компенсуються завдяки зниженню експлуатаційних витрат упродовж життєвого циклу будівлі. На основі проведеного аналізу сформульовано завдання дослідження, зокрема удосконалення методів розрахунку природної вентиляції з використанням вітровловлювача, дослідження впливу геометричних характеристик вітровловлювача на ефективність його роботи, порівняння ефективності пасивних та механічних рішень у різних умовах експлуатації, а також інтеграція пасивних систем у загальні схеми енергозбереження будівель.

У другому розділі представлено результати теоретичних досліджень та комп'ютерного моделювання роботи пасивної системи вентиляції з використанням вітровловлювача. Встановлено основні характеристики запропонованої конструкції вітровловлювача, зокрема її здатність забезпечувати стабільний приплив зовнішнього повітря незалежно від напрямку і швидкості повітряного потоку. Виявлено, що жалюзі (заслінки) вітровловлювача працюють як зворотний клапан, сприяють мінімізації зворотних втрат повітря та оптимізують рух повітряного потоку в системі. Розроблена фізична та числова моделі підтвердили доцільність інтеграції вітровловлювача як у енергоощадні, так і в термомодернізовані будівлі. На основі аналізу результатів моделювання в програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation визначено гідродинамічні особливості роботи вітровловлювача. Встановлено закономірності зміни швидкості та тиску повітря, а також формування вихрових зон залежно від кута та інтенсивності повітряного потоку. Результати моделювання та аналізу підтвердили, що застосування вітровловлювача дозволяє зменшити залежність будівель від механічних вентиляційних систем, забезпечуючи покращення параметрів мікроклімату завдяки стабільній природній подачі повітря, ефективному видаленню надлишкової вологи, вуглекислого газу та інших

забруднень Отримані результати показали, що при різних кліматичних умовах конструкція зберігає ефективність та сприяє кращому розподілу повітря в приміщеннях. На основі проведеного аналізу сформульовано завдання подальших досліджень, зокрема: оптимізація геометрії вітровловлювача, уточнення методів інженерного розрахунку, а також розширене вивчення його роботи в умовах сезонних коливань клімату.

У третьому розділі представлено результати експериментального й аналітичного дослідження гідродинамічних характеристик вітровловлювача пасивної системи вентиляції, що дозволило оцінити його ефективність за різних умов експлуатації. Досліджено, що основними факторами для визначення витрати вловленого вітровловлювачем повітря є швидкість кут набігаючого повітряного потоку. Встановлено, що навіть за низьких швидкостей набігаючого повітряного потоку (приблизно 0,5 м/с) витрата вловленого вітровловлювачем повітря становить 10,26 – 11,97 м³/год, що відповідає мінімальним нормативним вимогам повітрообміну для житлових приміщень (10 м³/год на людину згідно з діючими будівельними нормами), що підтверджує здатність системи забезпечувати мінімальний рівень природної вентиляції навіть за несприятливих кліматичних умов. Максимальний коефіцієнт корисної дії (94,4%) зафіксовано при кутах набігаючого повітряного потоку 0° та 45°, що підтверджує здатність конструкції ефективно працювати в різних умовах. Мінімальне значення ККД (86,1%) спостерігалось при куті 22,5°, однак і воно належить до високого рівня, що свідчить про універсальність і стабільність функціонування вітровловлювача. Отримано залежності для визначення витрати вловленого вітровловлювачем повітря при змінних швидкостях та кутах набігаючого повітряного потоку. Порівняння отриманих результатів із даними комп'ютерного моделювання (SolidWorks Flow Simulation) показало високий рівень збіжності. Коефіцієнт кореляції 0,97 та розбіжність, що не перевищує 8%, засвідчують надійність моделювання для прогнозування гідродинамічних характеристик вітровловлювача. Визначено коефіцієнт місцевого опору вітровловлювача ($\xi_{B/V} = 1,28$), який було рекомендовано

для подальших інженерних розрахунків. Апроксимація результатів досліджень показала, що величина місцевого опору вітровловлювача практично не залежить від швидкості набігаючого потоку.

У четвертому розділі розроблено методику гідродинамічного розрахунку пасивної системи вентиляції з використанням вітровловлювача. Досліджено, що для прогнозування роботи вентиляційної мережі потрібно враховувати такі параметри, як швидкість набігаючого повітряного потоку, аеродинамічний опір елементів системи, гідростатичний тиск тощо. Встановлено, що алгоритм покрокового визначення гідродинамічних характеристик дає можливість здійснювати інженерні розрахунки з урахуванням втрат тиску у вітровловлювачі, повітропроводах, місцевих опорах, а також розподілу швидкостей у вентиляційних каналах. Одержано універсальну залежність для визначення витрати вловленого вітровловлювачем повітря із урахуванням швидкості та кута набігаючого на вітровловлювач повітряного потоку.

У п'ятому розділі представлено результати аналізу економічної ефективності застосування вітровловлювачів у складі пасивних систем вентиляції для енергоощадних будинків. Встановлено, що інтеграція таких пристроїв дозволяє суттєво зменшити витрати на електроенергію, пов'язані з експлуатацією механічних вентиляційних установок, забезпечуючи фінансову економію в умовах зростання тарифів. Виявлено, що середній термін окупності інвестицій у встановлення вітровловлювачів становить 2 – 4 роки, залежно від кліматичних особливостей регіону, рівня вентиляційного навантаження та комплексу впроваджених енергоефективних рішень.

Окрім безпосереднього зниження енергоспоживання, застосування вітровловлювачів сприяє покращенню мікроклімату в приміщеннях, зменшенню навантаження на механічні компоненти вентиляційних систем, зниженню шумового впливу, а також продовженню терміну служби обладнання. На основі проведеного аналізу сформульовано завдання дослідження, що полягають у комплексній оцінці економічних вигод з урахуванням довгострокових

експлуатаційних переваг та перспектив інтеграції таких систем на етапі проєктування нових або модернізованих будівель.

Ключові слова: вітровловлювач, природна вентиляція, мікроклімат, повітрообмін, енергоефективні будівлі, енергоощадність, енергозбереження, енергоефективність, термомодернізація, повітряний потік, швидкість повітря, управління мікрокліматом, витрата повітря.

ABSTRACT

Savin V.V. Improving the efficiency of the microclimate maintenance system in energy-efficient buildings with passive ventilation. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the Doctor of Philosophy in the specialty 192 «Construction and Civil Engineering» - Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2025.

The dissertation is a completed scientific study that solves a topical scientific problem of practical importance for improving the efficiency of passive ventilation systems for energy-efficient buildings through the introduction of wind catchers.

The aim of the study is to improve the efficiency of the microclimate maintenance system in energy-efficient buildings with passive ventilation by introducing wind catchers, taking into account their hydrodynamic characteristics, design parameters, and the influence of climatic conditions.

The object of the study is the processes of air exchange formation in energy-efficient buildings under the action of natural aerodynamic forces in passive ventilation systems using wind catchers.

The subject of the study is the hydrodynamic characteristics of the wind catcher, in particular air intake depending on the direction and speed of the air flow, pressure losses in individual sections of the system, as well as the aerodynamic and energy characteristics of the passive ventilation system that affect its efficiency.

The scientific novelty of the results obtained is characterized by the following:

- for the first time, computer models of the air capture process have been developed for a wide range of wind speeds, which made it possible to evaluate the hydrodynamic characteristics of the proposed wind catcher design;
- for the first time, a computer model of a passive ventilation system using a wind catcher has been created, which made it possible to conduct simulation modeling of air

exchange and stratification of microclimate parameters in the interior of an energy-efficient building for different climatic conditions;

- for the first time, an assessment of the impact of wind pressure, taking into account its seasonality for the city of Kryvyi Rih, on the air intake efficiency of the wind catcher was performed. It was established that the efficiency of the wind catcher ranges from 86.1 to 94.4%;

- a generalized method for engineering calculations of passive ventilation systems with wind catchers based on physical and computer modeling has been improved, making it possible to take into account actual operating conditions when determining the required air exchange in rooms;

- approaches to the comprehensive assessment of the efficiency of passive ventilation systems in energy-efficient buildings using wind catchers have been further developed.

The practical significance of the results obtained is as follows:

- a methodology has been developed for the engineering calculation of passive ventilation systems with wind catchers, which allows the hydrodynamic characteristics and calculated air flow rate to the room to be determined depending on the geometric and aerodynamic characteristics of the system, as well as reducing calculation errors and increasing the accuracy of design solutions;

- a generalized algorithm for determining the efficiency of a passive ventilation system with a wind catcher is proposed, which reflects the general sequence of actions necessary to evaluate its functioning in accordance with established microclimatic requirements;

- the results of numerical and physical modeling can be used to create software or corresponding modules in CAD (computer-aided design) systems, which will automate engineering calculations for passive ventilation systems using wind catchers;

- the assessment of the economic feasibility of a ventilation system with a wind catcher in real operating conditions allows these solutions to be used in the reconstruction

of existing buildings or in the design of new energy-efficient facilities without the use of mechanical ventilation;

- a physical model of a wind catcher for a passive ventilation system in an energy-efficient building has been developed, which also has social implications as it contributes to improving sanitary and hygienic conditions in rooms. and a payback period of 2 – 4 years, depending on the ventilation load, climatic conditions of the region, type of building, and level of integration with other energy-efficient solutions (e.g., heat recovery or solar collectors);

- the results obtained create a scientific and technical basis for the development of new wind catcher designs capable of effectively capturing air flows, reducing energy costs for ventilation.

The results of the dissertation have been implemented at Kryvbasproekt LLC during the modernization of the supply ventilation system of the administrative block in order to improve the energy efficiency of the microclimate maintenance system, as well as in the production and design activities at Slavsant Pipe Plant LLC and AIT ENERGY PE.

The first chapter presents an analysis of modern energy-saving construction technologies and microclimate maintenance systems, focusing primarily on ventilation solutions. It has been established that mechanical ventilation systems provide stable air exchange but are characterized by significant energy consumption. It has been found that passive ventilation solutions, in particular those with wind catchers, can effectively reduce energy consumption while ensuring an adequate microclimate in the premises. It is noted that international energy efficiency standards are being actively implemented in Ukraine, but they still need improvement, particularly in terms of the application of passive ventilation technologies. In addition, it is noted that although the initial costs of implementing energy-saving systems are higher, they are offset by lower operating costs throughout the life cycle of the building. Based on the analysis, the research objectives were formulated, in particular, improving methods for calculating natural ventilation using a wind catcher, studying the influence of the geometric characteristics of wind catchers on their efficiency, comparing the efficiency of passive and mechanical solutions

under different operating conditions, and integrating passive systems into general building energy conservation schemes.

The second chapter presents the results of theoretical studies and computer modeling of the passive ventilation system using a wind catcher. The main characteristics of the proposed wind catcher design have been established, in particular its ability to provide a stable supply of outside air regardless of the direction and speed of the air flow. It has been found that the louvers (dampers) of the wind catcher act as a check valve, helping to minimize reverse air losses and optimize air flow in the system. The developed physical and numerical models confirmed the feasibility of integrating the wind catcher into both energy-efficient and thermally modernized buildings. Based on the analysis of the modeling results in the SolidWorks Flow Simulation software environment, the hydrodynamic features of the wind catcher's operation were determined. The patterns of change in air velocity and pressure, as well as the formation of vortex zones depending on the angle and intensity of the air flow, were established. The results of modeling and analysis confirmed that the use of wind catchers reduces the dependence of buildings on mechanical ventilation systems, improving microclimate parameters through stable natural air supply, effective removal of excess moisture, carbon dioxide, and other pollutants. The results showed that under various climatic conditions, the design remains effective and contributes to better air distribution in rooms. Based on the analysis, tasks for further research were formulated, in particular: optimization of the wind catcher geometry, refinement of engineering calculation methods, and an extended study of its operation under seasonal climate fluctuations.

The third chapter presents the results of experimental and analytical research on the hydrodynamic characteristics of a passive ventilation system wind catcher, which made it possible to evaluate its efficiency under various operating conditions. It was found that the main factors determining the air flow captured by the wind catcher are the speed and angle of the incoming air flow. It was established that even at low speeds of the oncoming air flow (approximately 0,5 m/s), the air flow captured by the wind catcher is 10,26 – 11,97 m³/h, which meets the minimum regulatory requirements for air exchange in

residential premises ($10 \text{ m}^3/\text{hour}$ per person according to current building codes), confirming the system's ability to provide a minimum level of natural ventilation even under unfavorable climatic conditions. The maximum efficiency (94,4%) was recorded at airflow angles of 0° and 45° , confirming the design's ability to operate effectively in various conditions. The minimum efficiency (86,1%) was observed at an angle of $22,5^\circ$, but it is still high, which indicates the versatility and stability of the wind catcher. Dependencies were obtained to determine the flow rate of air captured by the wind catcher at variable speeds and angles of the incoming air flow. A comparison of the results obtained with computer simulation data (SolidWorks Flow Simulation) showed a high level of convergence. A correlation coefficient of 0,97 and a discrepancy of less than 8% confirm the reliability of the simulation for predicting the hydrodynamic characteristics of the wind catcher. The local resistance coefficient of the wind catcher ($\xi_{w/c} = 1,28$) was determined and recommended for further engineering calculations. Approximation of the research results showed that the local resistance coefficient of the wind catcher practically does not depend on the speed of the incoming flow.

The fourth chapter develops a method for the hydrodynamic calculation of a passive ventilation system using a wind catcher. It has been found that in order to predict the operation of a ventilation network, it is necessary to take into account such parameters as the speed of the incoming air flow, the aerodynamic resistance of the system components, hydrostatic pressure, etc. It has been established that the algorithm for step-by-step determination of hydrodynamic characteristics makes it possible to perform engineering calculations taking into account pressure losses in wind catchers, air ducts, local supports, as well as the distribution of velocities in ventilation ducts. A universal dependence has been obtained for determining the flow rate of air captured by the wind catcher, taking into account the speed and angle of the air flow approaching the wind catcher.

The fifth chapter presents the results of an analysis of the economic efficiency of using wind catchers as part of passive ventilation systems for energy-efficient buildings. It has been established that the integration of such devices can significantly reduce the energy costs associated with the operation of mechanical ventilation systems, providing

financial savings in the context of rising tariffs. It was found that the average payback period for investments in the installation of wind catchers is 2 – 4 years, depending on the climatic characteristics of the region, the level of ventilation load, and the set of energy-efficient solutions implemented.

In addition to directly reducing energy consumption, the use of wind catchers helps improve the indoor climate, reduce the load on mechanical components of ventilation systems, reduce noise pollution, and extend the service life of equipment. Based on the analysis, the research objectives were formulated, which consist of a comprehensive assessment of economic benefits, taking into account the long-term operational advantages and prospects for the integration of such systems at the design stage of new or modernized buildings.

Keywords: wind catcher, natural ventilation, microclimate, air exchange, energy-efficient buildings, energy conservation, energy saving, energy efficiency, thermal modernization, air flow, air velocity, microclimate control, air consumption.

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Желих В.М., Савін В.В. (2023). Огляд особливостей використання вітровловлювачів у системах енергоощадної вентиляції. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Науково-технічний збірник. Випуск 47. Київ: КНУБА, 53 с. <http://vothp.knuba.edu.ua/article/view/308932> (Фахове видання категорії Б).

2. Savin V., Kirichenko P. (2024). Optimisation of air exchange in thermally modernised buildings by means of natural ventilation. Journal of Kryvyi Rih National University, 22(2), 60-67. <https://journal-knu.com.ua/en/journals/tom-22-2-2024/optimizatsiya-povitroobminu-v-termomodernizovanikh-budivlyakh-za-dopomogoyu-prirodnoyi-ventilyatsiyi> (Фахове видання категорії Б).

3. Savin V., Kirichenko P. (2023). Recuperators as a way to improve the efficiency of systems mechanical ventilation systems in terms of energy saving in buildings. Journal of Kryvyi Rih National University, 21 (1), 104-109. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-104-109> (Фахове видання категорії Б).

4. Savin V., Zhelykh V. (2023). Recuperators as an important element for energy efficiency in building ventilation systems. Construction of optimized energy potential. Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, Vol. 12, 71-78. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2023.12.08> (Закордонне фахове видання).

5. Savin V., Kirichenko P. (2024). Efficient use of ground heat exchangers in energy-saving ventilation. Journal of Kryvyi Rih National University, 22(1), 83-88. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2024-1-58-83-89> (Фахове видання категорії Б).

6. Myroniuk K., Furdas Y., Zhelykh V., Adamski M., Gumen O., Savin V., Mitoulis S-A. (2024). Passive Ventilation of Residential Buildings Using the Trombe Wall. Buildings, 14 (10), 3154. <https://doi.org/10.3390/buildings14103154> (SCOPUS / WEB OF SCIENCE, Q2).

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. Вавилюк В. Ю., Савін В.В. (24 – 26 травня, 2023, Кривий Ріг). Основні аспекти будівництва енергоощадних будинків. Міжнародна науково-технічна

конференція «Розвиток промисловості та суспільства». Кривий Ріг, 92 с. [Матеріали конференції](#).

8. Savin V., Zhelykh V. (8 – 10 November, 2023, Częstochowa, Poland). Recuperators as an important element of energy efficiency in building ventilation systems. XX International scientific-technical conference. Materials and energy saving technologies. Chestochowuniversity of technology.

9. Савін В.В., Желих В.М. (22 – 24 листопада, 2023, Київ). Особливості використання вітровловлювачів у системах енергоощадної вентиляції. IV Міжнародна науково-практична конференція «Енергія. Ресурси. Екологія». Багатофункціональні енерго- та ресурсоефективні екологічно безпечні технології в архітектурі та будівництві. Київ: КНУБА, 64 – 65. [Тези доповідей](#).

10. Савін В.В., Желих В.М. (27 – 29 листопада, 2024, Київ). Природна вентиляція як енергоефективне рішення для термомодернізованих будівель. V Міжнародна науково-практична конференція «Енергія. Ресурси. Екологія». Багатофункціональні енерго- та ресурсоефективні екологічно безпечні технології в архітектурі та будівництві. Київ: КНУБА, 75 – 76 с. [Тези доповідей](#).

11. Вавилюк В. Ю., Савін В.В. (22 – 24 травня, 2024, Кривий Ріг). Ґрунтовий повітряний теплообмінник. Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства». Кривий Ріг, 96 с. [Матеріали конференції](#).

12. Савін В.В. (28 – 30 травня, 2025, Кривий Ріг). Підвищення енергоефективності термомодернізованих будівель шляхом оптимізації природного повітрообміну. Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства». Кривий Ріг, 2025.

13. Патент України на корисну модель № 157039 UA МПК F24F 7/00 (2024.01). Вітровловлювач / В.В. Савін, В.М. Желих. 2024. № 36; заявл. 22.12.2023; опубл. 04.09.2024, бюл. № 36. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1816785/>

14. Патент України на корисну модель № 157606 UA МПК F24F 7/00 (2024.01). Вітровловлювач / В.В. Савін, В.М. Желих. 2024. № 45; заявл. 07.02.2024; опубл. 06.11.2024, бюл. № 45. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1826059/>

15. Патент України на корисну модель № 157537 UA МПК F24F 7/00 (2024.01). Вітровловлювач з заслінками для запобігання потрапляння атмосферних опадів до системи вентиляції / В.В. Савін, В.М. Желих. 2024. № 44; заявл. 12.03.2024; опубл. 30.10.2024, бюл. № 44. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1825064/>

16. Патент України на корисну модель № 157218 UA МПК F24F 7/00 (2024.01). Пристрій для вентиляції приміщень / В.В. Савін, В.М. Желих. 2024. № 38; заявл. 21.02.2024; опубл. 18.09.2024, бюл. № 38. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1818457/>

ЗМІСТ

Стор.

ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ОЦІНЮВАННЯ СИСТЕМ ПІДТРИМАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В ЕНЕРГООЩАДНИХ БУДИНКАХ	29
1.1. Порівняльний аналіз будинків за категоріями енергоспоживання	29
1.2. Аналіз стану технологій підтримання параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках	41
1.3. Схемні рішення систем забезпечення параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках	59
1.4. Сучасний стан пасивних систем підтримання параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках	70
1.5. Огляд наявних методик розрахунку пасивних систем підтримання параметрів мікроклімату в приміщеннях	78
1.5.1. Вентиляція, створена ефектом Стека	79
1.5.2. Вентиляція, створена вітровим тиском	82
1.6. Висновки до розділу 1. Постановка завдань досліджень	85
РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАСИВНИХ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ	89
2.1. Фізична модель вітровловлювача	89
2.2. Визначення гідродинамічних характеристик вітровловлювача	92
2.3. Комп'ютерне моделювання роботи пасивної системи вентиляції енергоощадного будинку	108
2.3.1. Результати моделювання для умов теплого періоду року	110
2.3.2. Результати моделювання для умов холодного періоду року	118
2.4. Висновки до розділу 2	135
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІТРОВЛОВЛЮВАЧА ПАСИВНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ	137

3.1. Методика проведення експерименту. Опис експериментальної установки..	137
3.1.1. Схема експериментальної установки	137
3.1.2. Порядок проведення експерименту	139
3.2. Результати експериментальних досліджень	142
3.3. Обробка результатів експериментальних досліджень	147
3.4. Оцінювання похибок проведеного експерименту	153
3.5. Аналіз збіжності експериментальних досліджень і результатів комп'ютерного моделювання	155
3.6. Визначення коефіцієнта місцевого опору вітровловлювача	159
3.6.1. Схема експериментальної установки	159
3.6.2. Порядок проведення експерименту	159
3.6.3. Результати експериментальних досліджень	161
3.7. Висновки до розділу 3	164
РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАСИВНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ З ВІТРОВЛОВЛЮВАЧЕМ	167
4.1. Методика інженерного розрахунку гідродинамічних характеристик пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем	167
4.2. Алгоритм обчислень основних гідродинамічних характеристик пасивної системи вентиляції із вітровловлювачем	175
4.3. Оцінювання ефективності роботи пасивної системи вентиляції для підтримання параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках	176
4.4. Висновки до розділу 4	181
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ВІТРОВЛОВЛЮВАЧІВ У СКЛАДІ ПАСИВНИХ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ	182
5.1. Схемні та принципові рішення використання вітровловлювачів у системах пасивної вентиляції енергоощадних будинків	182
5.2. Результати розрахунку економічної доцільності використання вітровловлювачів для пасивних систем вентиляції в енергоощадних будинках..	184
5.3. Оцінка можливості підвищення класу енергоспоживання будинків від	

упровадження запропонованих технічних рішень	186
5.4. Висновки до розділу 5	188
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	190
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	192
ДОДАТОК А. Список опублікованих праць. Особистий внесок здобувача	213
ДОДАТОК Б. Акти впровадження результатів роботи.....	218
ДОДАТОК В. Патенти на корисну модель.....	222

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. У процесі впровадження політики енергозбереження та модернізації будівельного фонду України все більше уваги приділяється термомодернізації житлових будинків. Одним із наслідків таких заходів є герметизація зовнішніх огорожувальних конструкцій, що значно знижує рівень природної інфільтрації повітря, яка раніше компенсувала відсутність повноцінної припливної вентиляції. У результаті цього в термомодернізованих будинках фіксується погіршення якості повітряного середовища, підвищення вологості, зростання ризику появи плісняви та несприятливих умов мікроклімату для мешканців.

У цьому контексті постає необхідність у пошуку ефективних, енергоощадних рішень вентилявання приміщень, здатних забезпечити нормативний повітрообмін без застосування вентиляторів. Одним із таких рішень є використання вітровловлювачів – пасивних пристроїв, які дозволяють організувати приплив зовнішнього повітря до приміщення за рахунок енергії вітрового потоку. Проте їх широке впровадження в практику стримується відсутністю інженерних методик розрахунку, що враховують змінні кліматичні умови, архітектурні форми будівель і геометричні характеристики вентиляційних каналів, а також вплив гідродинамічних характеристик системи.

Обґрунтування вибору теми дослідження. У сучасних умовах енергетичної нестабільності та зростання вартості енергоресурсів особливої важливості набувають дослідження, спрямовані на підвищення енергоефективності будівель. Значну частку енергоспоживання житлових і громадських будівель становлять витрати на забезпечення комфортного мікроклімату, зокрема на роботу системи вентиляції. Традиційні вентиляційні системи часто вимагають використання електричного обладнання для подання підготовленого припливного повітря, що призводить до збільшення експлуатаційних витрат.

У зв'язку з цим зростає інтерес до пасивних систем вентиляції, які функціонують без використання механічних засобів і дозволяють знизити споживання електроенергії. Одним із перспективних елементів таких систем є вітровловлювач - пристрій, здатний ефективно вловлювати зовнішнє повітря та спрямовувати його до вентиляційної мережі за рахунок дії природних сил (сила вітру, різниця тисків).

Попри те, що загальні принципи природної вентиляції є достатньо вивченими, практичне впровадження вітровловлювачів у сучасних енергоощадних будинках потребує подальших досліджень. Зокрема, недостатньо методик, які дозволяють точно оцінити гідродинамічну ефективність вітровловлювачів в умовах змінної швидкості та напрямку вітру, та які не враховували конструктивні особливості будівель (поверховість будинків, конфігурація дахів, наявність та вплив інших вітровловлювачів тощо).

Обраний напрям дослідження пов'язаний із розробленням і вдосконаленням методики інженерного розрахунку пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем, проведенням чисельного моделювання, а також експериментальних досліджень для оцінювання її гідродинамічних характеристик. Саме такий комплексний підхід дозволяє перейти від теоретичних уявлень до практичних інженерних рішень.

Указані обставини зумовлюють актуальність упровадження ефективних пасивних систем вентиляції, зокрема із використанням вітровловлювачів оригінальної конструкції, що дозволяють забезпечити необхідний повітрообмін без використання електроенергії. З огляду на це, наше дослідження присвячене вивченню закономірностей формування повітряного потоку в приміщеннях із використанням таких систем та обґрунтуванню гідродинамічної ефективності вітровловлювачів у різних кліматичних умовах і режимах експлуатації. Отже, підвищення ефективності функціонування пасивних систем вентиляції для енергоощадних будинків за рахунок впровадження вітровловлювачів є

актуальним науковим завданням, що має як прикладне, так і теоретичне значення.

Зв'язок дисертаційного дослідження з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до Указу Президента України №722/2019 «Про цілі сталого розвитку України на період до 2030 року», Постанови КМУ №145 «Енергетична стратегія України до 2030 року» та програми термомодернізації об'єктів комунальної сфери в Дніпропетровській області на 2015 – 2038 роки (від 23.01.2015 №610-29/VI). Вона відповідає тематиці науково-дослідних робіт Криворізького національного університету: «Визначення аеродинамічних параметрів системи вентиляції та температурних режимів роботи вентиляційної установки, встановленої на об'єкті: велика спортивна зала з глядацькими трибунами спорткомплексу двоповерхового фізкультурно-оздоровчого комплексу АТ «ПівдГЗК» реєстраційний номер 0122U000219), «Дослідження витратних аеродинамічних характеристик вентиляційного обладнання, встановленого на об'єкті: Їдальня № 3, що розташована на промайданчику ДФ ПрАТ «ЦГЗК», Кривий Ріг (реєстраційний номер 0122U000355).

Мета й завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування системи підтримання параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках із пасивною вентиляцією шляхом впровадження вітровловлювачів, із урахуванням їхніх гідродинамічних характеристик, конструктивних параметрів та впливу кліматичних умов.

Для досягнення поставленої мети вирішенню підлягають такі завдання:

1. Виконати критичний аналіз сучасного стану енергоефективних будинків і систем підтримання мікроклімату, зокрема рішень щодо можливості пасивного вентилявання приміщень.
2. Розробити фізичну та комп'ютерну моделі пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем для аналізу розподілу швидкостей повітряного потоку в

приміщенні в теплий і холодний періоди року та вивчення аеродинамічної поведінки повітряного потоку.

3. Експериментально дослідити вплив гідродинамічних характеристик вітровловлювача пасивної системи вентиляції на витрату повітря, що надходить у приміщення.

4. Розробити алгоритм інженерного розрахунку пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем для забезпечення нормативного повітрообміну в енергоощадному будинку.

5. Виконати техніко-економічне обґрунтування застосування вітровловлювачів у складі пасивних систем вентиляції.

Об'єктом дослідження є процеси формування повітрообміну в енергоощадних будинках під дією природних аеродинамічних сил у пасивних системах вентиляції із застосуванням вітровловлювача.

Предметом дослідження є гідродинамічні характеристики вітровловлювача, зокрема повітросприймання залежно від напрямку та швидкості повітряного потоку, втрати тиску на окремих ділянках системи, а також аеродинамічні та енергетичні характеристики пасивної системи вентиляції, що впливають на її ефективність.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених у роботі завдань використовувався комплексний підхід, що включав методи фізичного, математичного та комп'ютерного моделювання, а також експериментальні дослідження у лабораторних умовах.

Зокрема, методи чисельного моделювання були застосовані для визначення гідродинамічних характеристик вітровловлювача, включаючи розподілення швидкостей повітряного потоку, тиску та впливу конструктивних параметрів. Для побудови моделей використовувалися засоби обчислювальної гідродинаміки (CFD), а також методи теорії подібності та розмірностей при обґрунтуванні основних залежностей.

Фізичне моделювання проводилося на експериментальній установці, що дозволило перевірити достовірність теоретичних і чисельних результатів.

Експерименти охоплювали зміну кута та швидкості набігання повітряного потоку та оцінювання впливу цих параметрів на витрату вловленого вітровловлювачем повітря.

З метою підвищення вірогідності й точності результатів дослідження використовувалися методи планування експерименту, включаючи дублювання основних серій вимірювань, а також методи математичної статистики, зокрема усереднення отриманих даних, аналіз відхилень і побудову кореляційних залежностей.

Наукова новизна роботи

Уперше:

- розроблено комп'ютерні моделі процесу повітровловлювання в широкому діапазоні швидкостей вітрового потоку, що дало можливість зробити оцінку гідродинамічних характеристик запропонованої конструкції вітровловлювача.

- створено комп'ютерну модель системи пасивної вентиляції із застосуванням вітровловлювача, що дало змогу провести імітаційне моделювання організації повітрообміну та стратифікації параметрів мікроклімату в приміщенні енергоощадного будинку для різних кліматичних умов.

- виконано оцінку впливу вітрового напору із врахуванням його сезонності для міста Кривий Ріг на продуктивність повітрозабору вітровловлювачем. Встановлено, що коефіцієнт корисної дії вітровловлювача знаходиться в межах від 86,1 до 94,4%.

Удосконалено:

- узагальнену методику інженерного розрахунку пасивних систем вентиляції з вітровловлювачем на основі фізичного та комп'ютерного моделювання, що зробило можливим урахувати реальні умови експлуатації при визначенні необхідного повітрообміну в приміщеннях.

Подальшого розвитку набули:

- підходи до комплексної оцінки ефективності роботи пасивних систем вентиляції енергоощадних будинків із застосуванням вітровловлювачів.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено методику інженерного розрахунку пасивної системи вентиляції із вітровловлювачем, яка дозволяє визначати гідродинамічні характеристики і розрахункову витрату повітряного потоку до приміщення залежно від геометричних та аеродинамічних характеристик системи, а також зменшити похибку при розрахунках і підвищити точність проєктних рішень;
- запропоновано узагальнений алгоритм визначення ефективності роботи пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем, який відображає загальний порядок дій, необхідний для оцінювання її функціонування відповідно до встановлених мікрокліматичних вимог;
- отримані результати чисельного та фізичного моделювання можуть бути використані для створення програмного забезпечення або відповідних модулів у САПР (системах автоматизованого проєктування), що забезпечить автоматизацію інженерних розрахунків пасивних вентиляційних систем із використанням вітровловлювачів;
- проведено оцінювання економічної доцільності системи вентиляції з вітровловлювачем у реальних експлуатаційних умовах дає змогу використовувати ці рішення при реконструкції наявних будівель або при проєктуванні нових енергоощадних об'єктів без застосування механічної вентиляції;
- розроблено фізичну модель вітровловлювача для пасивної системи вентиляції енергоощадної будівлі, яка в результаті має і соціальні наслідки, оскільки сприяє покращенню санітарно-гігієнічних умов в приміщеннях, і термін окупності в межах 2 – 4 роки залежно від обсягу вентиляційного навантаження, кліматичних умов регіону, типу будівлі та рівня інтеграції з іншими енергоефективними рішеннями (наприклад, рекуперацією тепла або сонячними колекторами);
- отримані результати створюють науково-технічне підґрунтя для розробки нових конструкцій вітровловлювачів, здатних ефективно вловлювати повітряні потоки зменшуючи енерговитрати на вентиляцію.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у ТОВ «Кривбаспроект» при модернізації системи припливної вентиляції адміністративного блоку з метою підвищення енергоефективності системи підтримання параметрів мікроклімату, у виробничу і проєктну діяльність на ТОВ «Трубний завод Славсант» та ПП «АІТ ЕНЕРГО».

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні наукового завдання, мети, задач досліджень, наукових положень, новизни та висновків. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, особисто здобувачеві належить: дослідження доцільності застосування вітровловлювачів як енергоефективного елемента пасивної системи вентиляції, обґрунтування впливу конструктивних і гідродинамічних параметрів вітровловлювача на забезпечення нормативних параметрів мікроклімату [1]; здійснення порівняльного аналізу ефективності різних типів припливних елементів пасивної системи вентиляції у термомодернізованих будинках та виконання комп'ютерного моделювання розподілу повітряних потоків, температурних градієнтів та характеру повітрообміну в холодний і теплий періоди року з метою визначення оптимальних конструктивно-технологічних рішень для забезпечення нормативного повітрообміну без залучення механічних вентиляційних засобів [2]; проведення аналітичної оцінки ефективності використання енергоощадних технологій у системах вентиляції, зокрема рекуперативних припливно-витяжних систем вентиляції, з урахуванням їхніх конструктивних особливостей і напрямку руху повітряних потоків [3, 4]; обґрунтування доцільності застосування ґрунтових теплообмінників в якості блока попередньої обробки повітря у пасивних системах вентиляції житлових будинків для зменшення енергоспоживання на вентиляцію [5]; систематизація результатів досліджень застосування стіни Trombа як елемента пасивної вентиляції в модульних будинках [6]. Усі основні результати, представлені у дисертації, отримані автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень та окремі розділи дисертації доповідалися й обговорювалися на: Міжнародній науково-

технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (Кривий Ріг, 2023) [7]; XX International scientific-technical conference. Materials and energy saving technologies (Chestochowuniversity of technology, 2023) [8]; IV Міжнародній науково-практичній конференції «Енергія. Ресурси. Екологія». Багатофункціональні енерго- та ресурсоефективні екологічно безпечні технології в архітектурі та будівництві (Київ, 2023) [9]; V Міжнародній науково-практичній конференції «Енергія. Ресурси. Екологія». Багатофункціональні енерго- та ресурсоефективні екологічно безпечні технології в архітектурі та будівництві (Київ, 2024) [10]; Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (Кривий Ріг, 2024) [11]; Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (Кривий Ріг, 2025) [12].

Публікації наукових досліджень. За темою дисертації опубліковано 16 друкованих робіт, серед яких одна стаття в науковому журналі, що індексується наукометричною базою SCOPUS з квантилем Q2, одна стаття в закордонному виданні держави, яка входить до ОЕСР та ЄС, чотири статті в наукових фахових виданнях категорії «Б», 4 патенти України на корисну модель та 6 тез доповідей у матеріалах міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційне дослідження складається зі вступу, п'яти розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 181 найменування, трьох додатків, викладено на 226 сторінках друкованого тексту, зокрема 191 сторінка основного тексту, 74 рисунки і 14 таблиць.

Роботу виконано на кафедрі теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляції Криворізького національного університету.

Ключові слова: вітровловлювач, природна вентиляція, мікроклімат, повітрообмін, енергоефективні будівлі, енергоощадність, енергозбереження, енергоефективність, термомодернізація, повітряний потік, швидкість повітря, управління мікрокліматом, витрата повітря.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ОЦІНЮВАННЯ СИСТЕМ ПІДТРИМАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В ЕНЕРГООЩАДНИХ БУДИНКАХ

1.1. Порівняльний аналіз будинків за категоріями енергоспоживання

У сучасному світі в низці країн з розвинутою економікою стає дедалі актуальнішою проблема вичерпання енергетичних ресурсів. Потреби в енергії збільшуються з розвитком технологій. Очікується, що до 2035 року світове споживання енергії збільшиться втричі порівняно з 1998 р., що призведе до швидкого вичерпування запасів палива. Широке використання традиційних джерел енергії в житловому, транспортному та промисловому секторах ще більше ускладнює проблему [1], [2].

Ціни на електроенергію постійно зростають, а зміни клімату вимагають все більш обґрунтованого та раціонального ставлення не лише до енергоресурсів, але й до впровадження найефективніших методів їхнього споживання.

Переймаючи європейський досвід, Україна продовжує рухатися в напрямку енергозбереження [3]. Це було відображено на нормативному рівні виходом [4] і [5], які ввели до складу проєктної документації окремий розділ «Енергоефективність» та зобов'язання України впровадити три основні директиви Європейського Союзу: 2010/30/ЄС (про вказування за допомогою маркування та стандартної інформації про товар обсягів споживання енергії та інших ресурсів енергоспоживчими продуктами), 2010/31/ЄС (про енергоефективність будівель (ЕРЕЮ)) та 2006/32/ЄС (про ефективність кінцевого використання енергії та енергетичні послуги (з 25.10.2012 EED 2012/27/ЄС Про енергоефективність)).

Згідно з [6] «виконання вимоги щодо економії енергії та енергетичної ефективності здійснюється за рахунок використання системи заходів із: проєктування теплоізоляційної оболонки об'єктів будівництва із забезпеченням зниження теплових витрат через її елементи; використання об'ємно-планувальних рішень об'єктів будівництва, що одночасно забезпечують зниження теплових

витрат через теплоізоляційну оболонку та теплові надходження від сонячної радіації; застосування конструктивних рішень та обладнання, що забезпечують використання відновлюваних джерел енергії (включаючи сонячну радіацію) для потреб забезпечення необхідних параметрів внутрішнього повітря та для гарячого водопостачання; забезпечення регульованого повітрообміну, допустимого санітарними нормами; проєктування інженерного устаткування з урахуванням експлуатаційних температурних, вологісних режимів і технологічних процесів об'єктів будівництва; проєктування конструктивних рішень елементів теплоізоляційної оболонки з урахуванням змін теплофізичних характеристик матеріалів у процесі експлуатації виробів».

Низку вимог, щодо яких повинні відповідати будівлі, можна класифікувати: за призначенням – функціональні чи технологічні; за зовнішнім виглядом – архітектурні; за міцністю – конструктивні; за витратами енергетичних ресурсів – економічні. Економічне та раціональне споживання енергетичних ресурсів у приміщеннях житлового, господарського або промислового призначення можна охарактеризувати єдиним терміном «енергоефективність». Цей термін означає доцільне (ефективне) витрачання енергії. Енергетичні властивості будівель (споруд) визначаються витратами енергії на їхню експлуатацію від джерела енергії для забезпечення комфортного режиму в приміщеннях із урахуванням [6] кількості енергії, необхідної для задоволення потреб споживача при забезпеченні комфортного теплового режиму при опаленні будівлі, охолодженні, освітленні, що встановлюється відповідно до наявних методів розрахунку; «теплоннадходжень до будівлі від сонця – пасивного опалення, охолодження, природної вентиляції; балансових енергетичних характеристик 1-ї та 2-ї складових із урахуванням теплоізоляційних властивостей будівлі; підведеної до будівлі енергії, зареєстрованої для кожного виду енергоносія, включаючи електроенергію, енергію гарячого водопостачання, відновлювальні джерела енергії, когенерацію тощо; відновлюваної енергії, виробленої на прилеглий до будівлі території; енергії з відновлюваних джерел, що виробляється обладнанням, розміщеним на даху, фасаді,

прилеглий до будівлі території, та постачається до зовнішніх мереж; кількості використаної первинної енергії на потреби будівлі або кількості викидів CO₂» [7].

«Енергетична ефективність будинку – це властивість теплоізоляційної оболонки будинку та його інженерного обладнання забезпечувати оптимальні мікрокліматичні умови приміщень під час фактичних або розрахункових витрат теплової енергії на опалення будинків» [8]. Енергетичну ефективність будинку визначають такі показники [9], [10]:

- «– питомі тепловитрати на опалення будинку за опалювальний період;
- загальний коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційної оболонки будинку;
- приведений коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційної оболонки будинку;
- умовний коефіцієнт теплопередачі огорожувальних конструкцій будинку, що враховує тепловтрати за рахунок інфільтрації та вентиляції;
- середня кратність повітрообміну за опалювальний період;
- коефіцієнт скління фасадів будинку; показник компактності будинку.»

Клас енергоефективності будівлі визначається шляхом порівняння фактичних показників енергоспоживання з нормативними значеннями гранично допустимих теплових втрат для житлових та громадських будівель, установленими відповідними нормативними документами [4]. Питомі тепловитрати на опалення будинків – розрахункові або фактичні – повинні бути меншими за максимально допустиме значення питомих тепловитрат на опалення будинку за опалювальний період. Виконання цієї умови для будинку, що проєктується або експлуатується, перевіряється на підставі результатів експериментальних випробувань згідно з [11]. Клас енергетичної ефективності будівель (табл. 1.1) установлюється залежно від показника Δ_{EP} , %, і розраховується за формулою

$$\Delta_{EP} = [(EP_{use} - EP_p) / EP_p] \times 100,$$

де EP_{use} – загальний показник питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні;

EP_p – граничне значення питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні житлових і громадських будівель, що встановлюється згідно з мінімальними

вимогами до енергетичної ефективності будівель із урахуванням вимог частини другої статті 6 Закону України «Про енергетичну ефективність будівель» [12] (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Класифікація будинків за енергетичною ефективністю

Класи енергетичної ефективності будівлі	Відсоткові показники, Δ_{EP}	Споживання енергії на опалення, гаряче водопостачання, охолодження будівлі, за рік
A	$\Delta_{EP} < -50$	$< 44 \text{ кВт-год/м}^2$
B	$-50 \leq \Delta_{EP} < -20$	$< 79 \text{ кВт-год/м}^2$
C	$-20 \leq \Delta_{EP} \leq 0$	$< 87 \text{ кВт-год/м}^2$
D	$0 < \Delta_{EP} \leq 20$	$< 109 \text{ кВт-год/м}^2$
E	$20 < \Delta_{EP} \leq 35$	$< 131 \text{ кВт-год/м}^2$
F	$35 < \Delta_{EP} \leq 50$	$\leq 153 \text{ кВт-год/м}^2$
G	$50 < \Delta_{EP}$	$> 153 \text{ кВт-год/м}^2$

У сучасному світі енергоощадним вважається будинок з рівнем енергоспоживання до 70 кВт-год/м^2 на рік. У Швейцарії енергоощадним вважається будинок, побудований за стандартом «міненерджі» (MINERGIE-P), який передбачає витрати енергії на потреби опалення, гарячого водопостачання та вентиляції в розмірі 38 кВт-год/м^2 на рік, обов'язкове використання контрольованої вентиляції з рекуперацією тепла, а також споживання первинної енергії не більше 90%. Південно-тірольський кліматичний будинок (Італія) для опалення споживає поновлювані енергоносії до 50 кВт-год/м^2 на рік теплової енергії. У Німеччині найбільше енергоефективних будинків зводиться за стандартами KfW-55 і KfW-70, за якими річне споживання первинної енергії в будинку стандарту KfW-55 не повинно перевищувати 40 кВт-год/м^2 , а стандарту KfW-70 – 60 кВт-год/м^2 корисної площі будівлі [13]. У табл. 1.2 наведено енергетичну класифікацію будинків згідно з європейською енергоіндексацією.

Таблиця 1.2

Енергетична класифікація будівель

Енергетичне оцінювання	Показники ЕА (кВт-год/м ² -рік)
Високо–енергоємний	≥ 250
Енергоємний	150 – 250
Середньо–енергоємний	100 – 150
Середньо–енергоощадний	80 – 100
Енергоощадний	45 – 80
Низько–енергоощадний	15 - 45
Пасивний	≤ 15

Саме з кінця 90-х років минулого століття у всьому світі починається зміна самої ідеї будівництва, результатом якої вже у XXI столітті є прагнення до гармонійного поєднання самої будівлі з довкіллям і мікрокліматом у приміщенні. Нові підходи до проектування й будівництва отримали назву «зелене» будівництво, або «екологічне» будівництво, тобто будівництво та експлуатація будівель, які поєднують менший рівень споживання енергії й матеріалів протягом усього життєвого циклу будівлі, та мінімальний негативний вплив будівель на довкілля й життєдіяльність людини [14], [15].

Мета «зеленого» будівництва – підвищення енергоефективності, зменшення залежності від викопного палива й забезпечення приємного та здорового середовища в приміщенні для більшого задоволення та продуктивності мешканців. Основними принципами «зеленого» будівництва є:

- гармонійне розташування будівлі в довкіллі;
- максимальне використання сонячної енергії завдяки південному розміщенню вікон у будівлі;
- мінімізація споживання енергії;
- підвищення ефективності використання альтернативних джерел енергії;
- покращення характеристик теплоізоляції будинку та її безпечність для здоров'я людини та середовища;

- використання установок з рекуперацією тепла;
- використання екологічних, відновлюваних і переробних матеріалів;
- використання місцевого матеріалу;
- автоматична система опалення;
- ощадне й ефективне водопостачання;
- сприяння екологічному, економічному та соціальному розвитку.

До особливостей, які можуть зробити будівлю «зеленою», можна віднести [16]:

«- ефективне використання енергії, води та інших ресурсів;

- використання відновлюваної енергії, наприклад, сонячної енергії;

- заходи щодо забруднення та зменшення відходів, а також можливість повторного використання та переробки;

- хороша якість повітря в приміщенні;

- використання нетоксичних, етичних і екологічно чистих матеріалів;

- урахування довкілля при проектуванні, будівництві та експлуатації;

- урахування якості життя мешканців при проектуванні, будівництві та експлуатації;

- конструкція, що дозволяє адаптуватися до мінливого середовища.»

Концепція «зеленого» житлового будівництва охоплює дев'ять характерних типів архітектурно-планувальних рішень [17]:

1) енергоефективна будівля з низьким або нульовим споживанням енергії (zero-energy building) – будівля із високим рівнем енергоефективності, яка може забезпечувати себе енергією за рахунок відновлюваних джерел. Якщо вона генерує менше енергії, ніж споживає, її відносять до категорії будівель із майже нульовим споживанням енергії (near zero-energy building). Головна перевага полягає в тому, що цей тип будівель повністю покриває свої енергетичні потреби за рахунок відновлюваних джерел;

2) пасивна будівля – в будівлі використовуються енергоощадні будівельні матеріали і поновлювальні джерела енергії. Головною перевагою є постійна циркуляція чистого і теплого свіжого повітря;

3) біокліматична архітектура – будівля використовує зашклені простори і природну освітленість, при зведенні враховується клімат регіону;

4) інтелектуальна (smart home) або розумна будівля (digital house) – в приміщеннях і конструкціях будівлі оптимізовано світлові та теплові потоки за допомогою штучного інтелекту та/або програмного забезпечення, яке поєднує між собою та керує всіма електроприладами будівлі;

5) будівля високих технологій (хай-тек-будівля) – у будівлі застосовуються сучасні архітектурні рішення, інноваційні конструкції та матеріали;

6) здорова будівля – у будівлі перевага надається природним і екологічно безпечним будівельним матеріалам;

7) будівля нульового впливу (Zero Impact Building) або будівля з нульовим споживанням енергії та нульовими відходами (Zero Energy & Zero Waste Building) – у будівлі споживання енергії компенсується повністю відновлюваними джерелами (сонце, вітер, геотермальна енергія), відходи життєдіяльності переробляються або мінімізуються до нуля, вода використовується в замкнених чи повторних циклах, а сама будівля інтегрована у довкілля так, щоб не створювати додаткового навантаження;

8) еколоутек – для зведення цього типу будівлі використовуються природні місцеві матеріали (солома, глина та інше)

9) еко футуризм – це сучасний підхід у будівництві, який передбачає використання штучних матеріалів нового покоління, що не становлять токсичної загрози та інтегруються в безвідходні виробничі цикли. Після завершення життєвого циклу будівлі її елементи або природно розкладаються в ґрунті, або повторно залучаються до виробництва як вторинні ресурси.

В Україні «зелене» будівництво – це новий напрямок, який має перспективу розвитку завдяки впровадженню міжнародних стандартів сертифікації «зелених» будівель BREEAM (Великобританія), LEED (США) та DGNB (Німеччина). Однак, національні зелені стандарти будівництва, відповідно до вимог ООН та ЄС, досі не розроблені в Україні та не пройшли верифікацію на міжнародному рівні, а

будівельні технології, які зараз застосовуються в Україні, не відповідають стандартам сертифікації [18], [19], [20].

Згідно з європейським досвідом в Україні прийнято таку градацію наявних будівель:

- старі будівлі, які зведені до 2007 року та споживають на опалення й охолодження до 300 кВт-год/м²;
- нові будівлі, зведені до 2016 року зі споживанням енергії близько 150 кВт-год/м²;
- енергоефективні будівлі з низьким споживанням енергії, близько 60 кВт-год/м², їх характерними відмінностями є низьке енергоспоживання та здоровий мікроклімат;
- пасивні будівлі, зведені за стандартом *passive house*, зі споживанням, меншим за 15 кВт-год/м², головною концепцією яких є їхня компактність, правильна геометрія, орієнтація за сторонами світу та якісне утеплення;
- будівлі з нульовим споживанням енергії відрізняються достатньою енергоефективністю й нульовим споживанням за рахунок виробництва енергії з відновлювальних джерел, яка рівномірно використовується протягом усього року;
- будівлі класу «Енергія+» виробляють більше енергії, ніж самі споживають, використовуючи встановлене інженерне обладнання (сонячні батареї, колектори, теплові насоси, рекуператори та інші).

Порівняння європейських і українських підходів до класифікації будівель свідчить, що всі стратегії розвитку галузі спрямовані на зведення енергоефективного житла, мінімізацію енергоспоживання протягом усього життєвого циклу будівлі та підвищення якості споруд і комфорту внутрішнього середовища. На підставі цього можна сформулювати основні завдання енергоощадного будівництва:

- упровадження та застосування відновлювальних джерел енергії;
- підвищення їх ефективності використання;
- зменшення викидів газів в атмосферу;

- застосування енергоощадних, природних та безпечних матеріалів для зменшення їхнього негативного впливу на здоров'я людини та довкілля;
- зниження експлуатаційних витрат і витрат теплової енергії.

У табл. 1.3 наведено витрати теплової енергії за видами будівель в Україні.

Таблиця 1.3

Витрата теплової енергії за видами будівель в Україні

Індивідуальний житловий будинок 140 м ² загальної площі	Річна витрата тепла, кВт-год/м ³ - рік	Питома витрата тепла, Вт-год/м ²
Будинки старої забудови (до середини 90-х рр.)	600	125
Будинки згідно з ДБН В 2.2-15-2005	150	70
Будинки низького енергоспоживання	70	14-32
Будинки ультранизького енергоспоживання	30-15	14-7
Сучасний пасивний будинок	Менше 15	Менше 7

Згідно з даними, наведеними в Національному плані дій з енергоефективності України [21], на будівлі припадає 42% загального кінцевого споживання енергії в Україні, а лише на житлові будинки припадає 33%, або 17,04 млн т.н.е., загального кінцевого споживання енергії (табл. 1.4).

Таблиця 1.4

Загальне кінцеве споживання енергії в національному фонді будівель України

Загальне кінцеве споживання енергії, млн т.н.е.	51,65
Будівлі, млн т.н.е.	21,89
Частка будівель, з яких:	42%
Нежитлові будівлі, млн т.н.е.	4,85
Житлові будівлі, млн т.н.е.	17,04

На рис. 1.1 представлено поділ житлових будинків за роком будівництва загалом по Україні та структуру житлового фонду за роком будівництва [22].

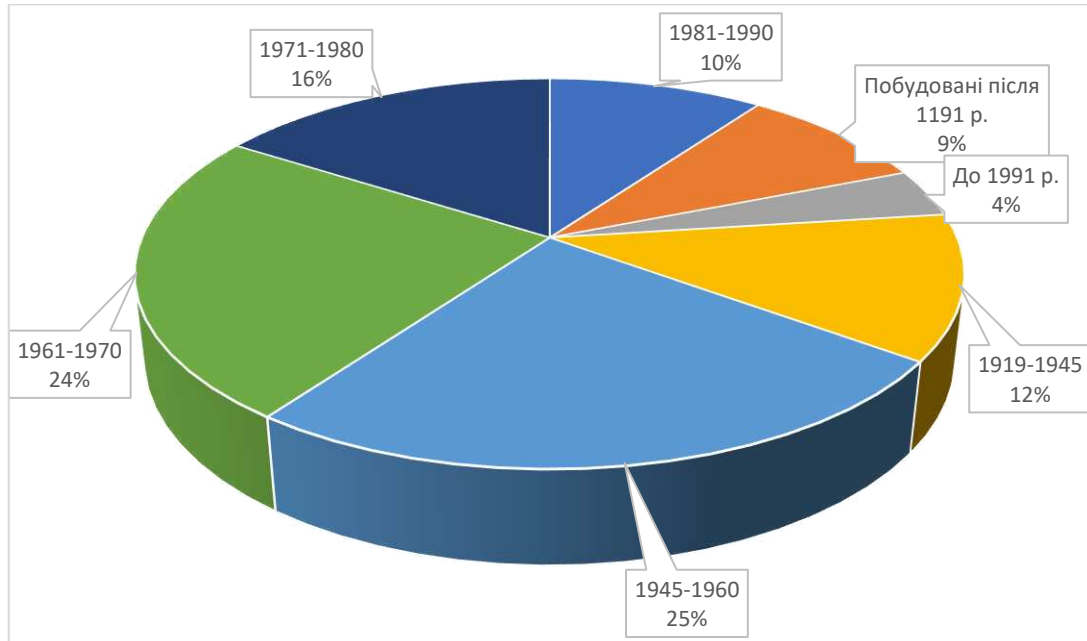


Рис. 1.1. Структура житлового фонду за роком будівництва [22]

Будинки, зведені до 1970 р., не відповідають архітектурно-планувальним, санітарно-гігієнічним та експлуатаційним вимогам, а питоме енергоспоживання на опалення становить 200-300 кВт·год/(м²·рік). На житловий сектор в Україні припадає близько 33 % кінцевого споживання енергії та понад 38 % використання теплової енергії. Високі енерговитрати характерні як для етапу будівництва, так і для подальшої експлуатації житла протягом усього життєвого циклу.

На рис. 1.2 та 1.3 представлено розрахунки показників питомого енергоспоживання [22].

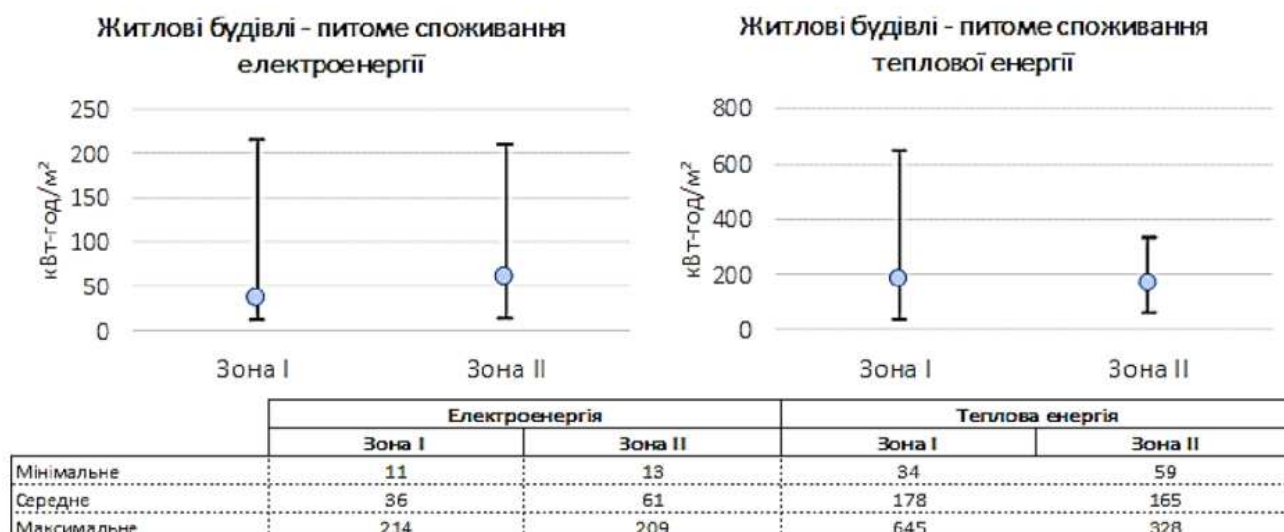


Рис. 1.2. Питоме споживання електричної та теплової енергії в житлових будинках [22]

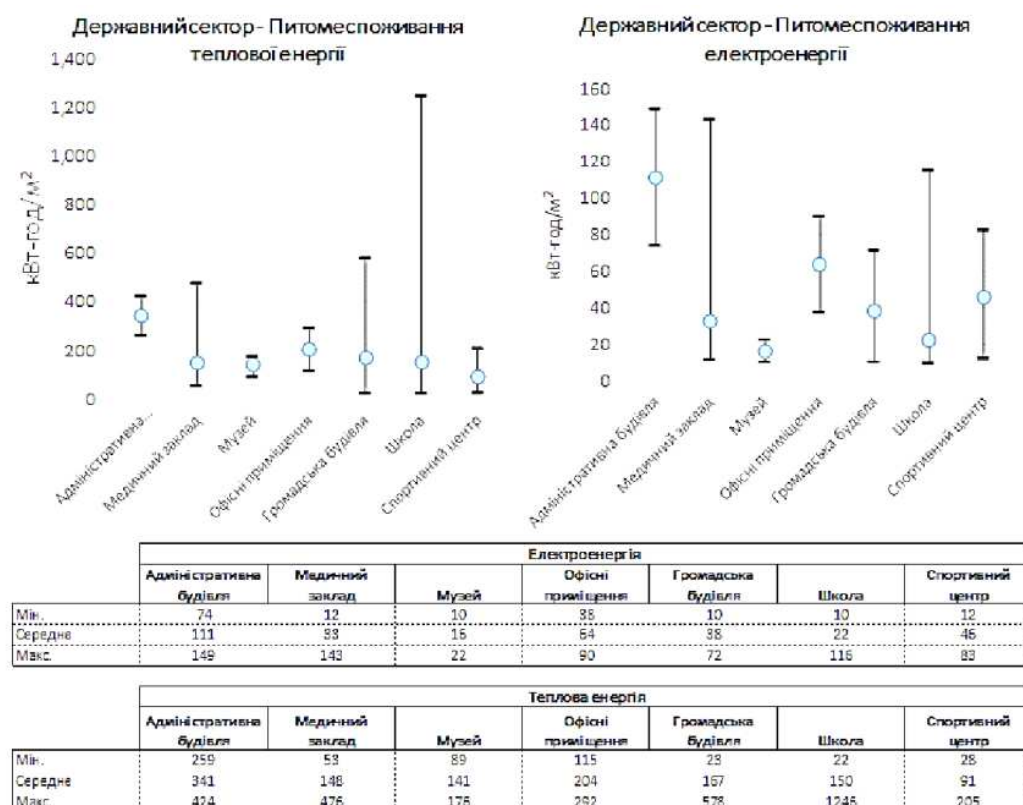


Рис. 1.3. Питоме споживання електричної та теплової енергії у громадських будівлях [22]

Наявні будівлі, що експлуатуються, не відповідають сучасним вимогам енергоефективності в Україні [4], унаслідок чого підвищення енергоефективності будівельного фонду визначається соціальною необхідністю і є актуальною проблемою держави. Шляхом до розв'язання цієї проблеми є реформування житлово-комунального господарства, удосконалення чинної нормативної бази з підвищенням вимог щодо енергоефективності для нових будівель [23], упровадження енергоощадних заходів у наявних будівлях та збільшення обсягів будівництва низькоенергетичних будинків із використанням різних інноваційних енергоощадних технологій, із урахуванням їх енергетично-екологічних показників.

Європейський Союз, згідно з прийнятою директивою [24] та змінами в [25], з 2021 року перейшов на новий будівельний стандарт, який дозволяє зведення будинків класу низького енергоспоживання (не більше 60 кВт-год./м²-рік), у яких частково будуть використовуватись відновлювальні джерела енергії. А згідно директиви 2009/28/ЕС, від будівлі вимагається як значне скорочення споживання первинної енергії, так і викидів парникових газів, гарантуючи високий рівень комфорту проживання, з метою економічної та фінансової оптимізації. Це дало поштовх для розроблення й реалізації сучасного житла – енергоефективного житлового будинку (пасивні будівлі, будівлі з нульовим споживанням енергії та будівлі класу Енергія+), який відіграє важливу роль у зменшенні викидів парникових газів і збереженні енергії.

Однак, не слід забувати, що енергоощадні будинки також потребують певних затрат енергії. Системи гарячого водопостачання, опалення, вентиляції, освітлення та побутові прилади потребують енергії для роботи, хоча і в менших кількостях, ніж у звичайних будинках. Використання альтернативних джерел енергії (сонячний колектор, теплові насоси, особливі системи вентиляції та водовідведення) може бути витратним і складним процесом, а інсталяція таких систем часто вимагає значних фінансових вкладень.

Відновлювальні матеріали й технології, проектування та встановлення систем енергоефективності суттєво впливають на вартість енергоощадного будинку, яка,

порівняно з будинком традиційного типу, вища майже на 20%, а окупність, із урахуванням використання альтернативних джерел енергії, електроприладів і побутової техніки виключно з рівнем енергоспоживання класу A+, становить 10-12 років, після чого будинок почне приносити своїм власникам прихований прибуток.

Одним із шляхів щодо зменшення енерговитрат енергоощадними будинками є використання пасивної (природної) системи вентиляції, здатної забезпечити сталу циркуляцію свіжого повітря всередині будинку.

1.2. Аналіз стану технологій підтримання параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках

Постійне зростання цін на енергоносії вимагає активного пошуку нових рішень у галузі енергоефективності й енергозбереження, а також упровадження інноваційних технологій у промисловості та побуті. Учені багатьох галузей зосередилися на пошуку екологічної, економічної, комфортної та енергонезалежної будівлі. Усі ці зусилля поєднав в одну концепцію професор Лундського університету Бо Адамсон та доктор з Інституту житлового будівництва та охорони довкілля Вольфганг Файст [26]. Під час розрахунків енергетичних балансів будівель було з'ясовано, що якщо для обігріву будівлі буде достатньо тепла, яке надходить через систему вентиляції, то ця будівля не потребує активної системи опалення. Так у травні 1988 року з'явилася концепція енергоощадної будівлі: зниження споживання енергії та забезпечення максимально комфортного мікроклімату для мешканців [27]. У 1991 році розпочалося будівництво в Дармштадті (Німеччина) першого у світі пасивного будинку. Саме цей проєкт став прикладом будівництва майбутнього - вискоєфективний будинок з найвищим рівнем комфорту та мінімальним споживанням енергії. Сьогодні терасний будинок, де проживають чотири родини, підтверджує свою ефективність та потребує менше 15 кВт-год/м² на рік уже понад 30 років.

Основна ідея полягає в тому, щоб підтримання оптимальних параметрів мікроклімату в будинку здійснювалося лише за рахунок використання природних ресурсів: утилізації теплоти витяжного повітря для підігріву припливного повітря, використання теплоти сонячної радіації та внутрішніх тепловиділень (від людей, побутових приладів), альтернативних джерел тепла, а охолодження – за рахунок особливостей конструкції та властивостей будматеріалів [28].

Енергоощадний будинок поєднує неперевершений комфорт та низьке споживання енергії. Зовнішній вигляд мало чим відрізняється від стандартних будівель навколо, адже технологія енергоощадного будинку описує стандарт енергоефективності, а не метод будівництва. Для того щоб будинок був комфортним та енергоощадним, необхідно, перш за все, належним чином захистити його від втрат тепла, які притаманні кожній будівлі (рис. 1.4).

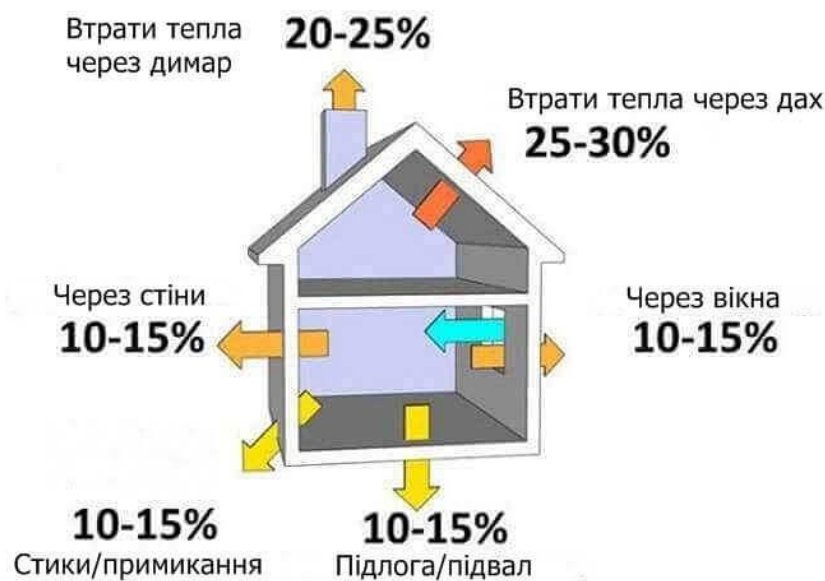


Рис. 1.4. Тепловтрати в будинку

За останні роки були зведені тисячі об'єктів енергоощадного будівництва в усьому світі. Причиною успіху є те, що стандарти енергоощадного будинку працюють у всіх кліматичних зонах, забезпечуючи мінімальне споживання енергії. Згідно зі статтею 6 Закону України «Про енергетичну ефективність будівель»

енергоощадним вважається будинок з рівнем річного енергоспоживання до 70 кВт·год/м². До будинків, які дотримуються виконання цієї вимоги, можна віднести будинки, у яких використовуються архітектурно-будівельні засоби підвищення їхньої енергоефективності [29]:

- пасивні будинки (річне споживання теплової енергії менше 15 кВт·год/м²) [30], [31];

- будинки з нульовим споживанням енергії (нульове споживання за рахунок виробництва енергії з поновлювальних джерел, яке рівномірно використовується протягом всього року) [32], [33], [34];

- будинки класу Енергія+ (виробляють більше енергії, ніж самі споживають) [35], [36], [37], [38], [39].

Директива енергетичних показників у будівництві (Energy Performance of Buildings Directive), ухвалена країнами Євросоюзу в грудні 2009 року, свідчить про те, що після 31 грудня 2019 року в Європі дозволено зводити будинки тільки за стандартом, що є не нижчим за пасивний.

Концепція пасивного будинку припускає, що це відносно недороге будівництво, а різниця у вартості має швидко окупитися за рахунок низьких експлуатаційних витрат. Спроектований і побудований пасивний будинок, розрахований на багато років експлуатації, при мінімальних додаткових витратах може стати нульовим, а при трохи великих – активним. Слід зауважити, що будинки з нульовою або Енергією+ не відрізняються від пасивного стандарту ні своїми архітектурно-планувальними прийомами, ні основними принципами проектування й будівництва [40]. У них збільшується лише кількість і потужність інженерного обладнання. Тому можна зробити висновок, що будинком з нульовим споживанням енергії та будинком класу Енергія+ може бути будь-який будинок при встановленні в ньому відповідної потужності вітрогенератора, сонячних батарей або біогазової установки. Тому принциповою різницею є лише додаткові витрати на енергоощадне обладнання.

Однак поняття «пасивний будинок» зовсім не означає, що будинок зовсім не потребує енергії. Пасивні будинки повинні відповідати таким параметрам енергоспоживання [8]:

«– попит на опалення не перевищує 15 кВт-год/(м²-рік); для порівняння: щоб обігріти двокімнатну квартиру в сучасній багатоповерхівці, потрібно щонайменше 210 кВт-год/м²;

– загальне споживання первинної енергії на опалення, нагрівання води й електрику не повинне перевищувати 120 кВт-год/(м²-рік); для порівняння: в Україні ця цифра більша за 360 кВт-год/(м²-рік);

– для нормального функціонування системи вентиляції атмосферний тиск у приміщенні має бути нижчим від тиску назовні в 0,6 раза завдяки дверям спеціальної конструкції.»

Пасивний будинок проєктується таким чином, щоб не за допомогою інженерного обладнання та використання енергоресурсів (активно), а за допомогою архітектурно-планувального рішення (пасивно) поглинати, акумулювати та зберігати максимальну кількість тепла/холоду з довкілля. Це досягається завдяки раціональному архітектурному проєктуванню, яке забезпечує максимальне проникнення низького зимового сонця в будівлю, ефективний захист від перегріву в літній період, а також тривале збереження отриманого тепла або прохолоди за рахунок якісної теплоізоляції та продуманих просторово-планувальних рішень, що ґрунтуються на принципі зонування [41]. За допомогою програмного забезпечення PHPP (Passivhaus Projektierungs-Paket або пакету планування пасивного будинку), розробленого німецьким Passivehaus Institut у 2003 р. [42], розраховуються характеристики пасивної будівлі. При виконанні наступних прийомів пасивним способом можна зекономити до 87% енергії [43- 45]:

- «– правильна орієнтація будівлі за сторонами світу;
- якісна теплоізоляція огорожувальних конструкцій;
- компактність будівлі;

- наявність масивних частин у місцях, куди потрапляють прямі сонячні промені від низького зимового сонця, забезпечуючи акумуляцію тепла;
- планування неглибоких приміщень, у яких низьке сонце потрапляє на задню (бажано темну) стіну, прогріваючи її;
- розміщення зимових садів на південній стороні будинку;
- використання стін-тромбу;
- використання буферних зон (допоміжних приміщень) на північній стороні будинку;
- вітрозахист північного глухого боку будівлі, закритість (зелені насадження, ліс, інша будівля тощо);
- відкритість із півдня (відсутність затінення);
- правильне скління будівлі;
- розташування на південній стороні будинку світлопрозорих конструкцій, які здатні пропускати у будівлю промені зимового сонця, та повна їх відсутність на північній стороні будинку;
- пасивний захист від перегріву влітку;
- використання підземних каналів для попереднього підігріву/охолодження повітря/води;
- припливно-витяжна система вентиляції з рекуперацією;
- максимальна герметичність і повітронепроникність будівлі».

Ключовою метою енергоощадного будівництва є забезпечення теплового комфорту шляхом підвищення температур внутрішніх і зовнішніх поверхонь будівельних огорожувальних конструкцій. У пасивних будинках завдяки інноваційним технологіям і матеріалам забезпечується однаковий тепловий комфорт як узимку, так і влітку.

Прикладом проєкту пасивного будинку у Швеції (рис. 1.5), метою якого є популяризація екотехнологій і їхня доступність, є вілла Nyberg, яка побила рекорди за теплоізоляцією у Швеції [46]. Вілла обладнана сонячними батареями, вітрогенераторами, колекторами опадів і системою природного очищення води.

Особливість цього будинку – кругла конструкція, яка дозволяє зменшити площу стін, а отже – зберегти тепло. Будівля орієнтована за сторонами світу. Приміщення сконцентровані навколо центрального атриуму. Концепція будівлі – відтворення внутрішнього добового циклу людини з можливістю мешканцям протягом дня обходити всі приміщення по колу.



Рис. 1.5. Круглий пасивний будинок в Швеції [46]

Ще одним прикладом ультрасучасного пасивного будинку в Канаді є резиденція Керчум (рис. 1.6), розроблена для сім'ї з потенційним збільшенням кількості мешканців, що поєднує приватну й розважальну частини [47]. Унікальністю цього будинку є сучасна архітектура та планування з оригінальною об'ємною візуальною композицією, де всі ландшафтні елементи гармонійно вписані в загальну композицію, а для озеленення території (покрівлі та балкона) використано місцеві рослини, стійкі до посухи. Цей будинок є першим у Західній Канаді, що відповідає стандарту LEED Platinum і отримав премію 2011 RAIC Award of Excellence for Green Building.



Рис. 1.6. Ультрасучасний пасивний будинок у Канаді [47]

Одним із багатьох прикладів пасивного будівництва в Україні, який додано до каталогу Інституту пасивного будинку в Дармштадті, є будинок київської архітекторки Тетяни Ернст (рис. 1.7 в) або, як його ще називають, «Дім сонця» [48]. В основі планування є квадрат, зорієнтований за сторонами ділянки. Усе енергопостачання, включаючи опалення, кондиціонування і підігрів води для побутових потреб і басейну, базується на альтернативних джерелах: сонячні колектори, які направлені на південь, ґрунтовий теплообмінник і геотермальний тепловий насос. Система вентиляції запроєктована таким чином, що свіже припливне повітря взимку при температурі -10°C попередньо підігрівається в ґрунтовому теплообміннику до температури $+12^{\circ}\text{C}$. А після проходження рекуператора температура повітря піднімається вже до $+15^{\circ}\text{C}$ [49]. Отже будь-яке додаткове підігрівання повітря виявляється вже не потрібним, а свіже припливне повітря надходить у будинок підігрітим лише пасивним способом.



а)



б)



в)



г)



д)



ж)

Рис. 1.7. Приклади пасивних будинків в Україні: а – пасивний екобудинок у стилі органічної архітектури в Сімферополі; б – екобудинок у Чернігові; в – «Дім сонця», екобудинок у Києві; г – «Солітер», екобудинок у Василькові; д – «Екобудинок у пагорбі», дитячий екобудинок сімейного типу під Каневом; ж – екобудинок в Одесі [48], [49]

Принцип енергоощадного житла полягає в тому, що в процесі експлуатації воно споживає зовсім незначну кількість енергії: орієнтовно 10% від стандартного споживання. Такий ефект досягається завдяки використанню теплоефективних матеріалів, вікон з високим рівнем енергоефективності, ергономічної конструкції дому та застосуванню якісних утеплювачів. Дослідження показали, що витрати енергії на опалення й охолодження енергоощадного будинку буде на 80 відсотків нижчими, ніж у звичайних будівлях, що дозволяє скоротити загальні енерговитрати будинком приблизно на 60%-70%, а за умови підтримання оптимальних параметрів мікроклімату (внутрішня температура $+19^{\circ}\text{C} \dots +20^{\circ}\text{C}$) питома витрата теплової енергії не перевищує 15 кВт-год/м²-рік (альтернативний критерій: розрахункове опалювальне навантаження не повинно бути вище 10 Вт/м², іншими словами, на 100 м² площі будівлі потрібно не більше 1 кВт теплової потужності). Для порівняння: тепловтрати стандартного цегляного будинку досягають 250-350 кВт/год з квадратного метра опалювальної площі на рік.

Звичайно, наведені умови стосуються лише новобудов, але будь-який будинок можна зробити енергоощадним без кардинального перепланування та масштабних будівельних робіт, виконавши декілька умов: змінити вікна на енергоощадні; встановити розумні жалюзі із сонячними батареями; установити подвійні входні двері; збільшити теплоізоляцію зовнішніх стін; обладнати будинок комп'ютерним керуванням з елементами штучного інтелекту для оптимізації витрат енергії "розумний дім", яка здатна знизити енергетичну залежність на десятки відсотків; установити установку з рекуперації тепла в систему вентиляції; обладнати системи опалення та вентиляції сучасними технологіями, які використовують альтернативну енергію.

Низькі енерговитрати енергоощадного будинку покриваються енергією, яку можна отримати застосуванням як активних (сонячні батареї, мініатюрні вітряні електростанції, теплові насоси) (рис. 1.8), так і пасивних систем (буферні зони, стіна Тромба-Мішеля, прибудовані теплиці, зимові сади, акумулятори сонячної

енергії, ґрунтові повітряні теплообмінники) використання відновлювальних джерел енергії [50-56].



Рис. 1.8. Активні системи використання відновлювальних джерел енергії

Енергія сонця використовується для різних потреб будинку: для отримання електроенергії, гарячої води та для потреб системи підтримання параметрів мікроклімату. Серед усіх відновлювальних ресурсів сонячна енергія є найпоширенішою, невичерпною та найчистішою [57]. У сонячних батареях енергія сонця перетворюється на електрику за принципом фотоелектричного ефекту, який відбувається в матеріалах, що мають різні характеристики провідності [58]. Для забезпечення будинку необхідною сонячною енергією потрібні доступні додаткові площі. Зовнішні фасади та дахи будинків зараз перетворюються на повноцінну активну оболонку будівлі, де фотоелектричні модулі стали частиною естетики цієї технології [59]. Окрім самих сонячних батарей, до комплекту системи входить інвертор, контролер заряду, акумуляторні батареї та інше допоміжне обладнання (рис. 1.9). При використанні сонячного колектора нагрітий теплоносіє використовується для потреб теплопостачання (опалення, гарячого водопостачання), дає можливість суттєво заощадити, але потребує використання додаткового механічного обладнання (наприклад, геліополя з декількох колекторів; насосної станції геліоконтур; автоматики керування тощо).

Вітрові електростанції перетворюють кінетичну енергію вітру в електричну енергію. Їх доцільно встановлювати у відкритих місцевостях, де відсутні значні перешкоди (високі будівлі або дерева), а середньорічна швидкість вітру перевищує 3,5 м/с. Ефективність та економічна доцільність використання таких систем значною мірою залежать від потреби у додатковому обладнанні, що впливає на загальну вартість проєкту та складність його монтажу [60] (рис. 1.6).

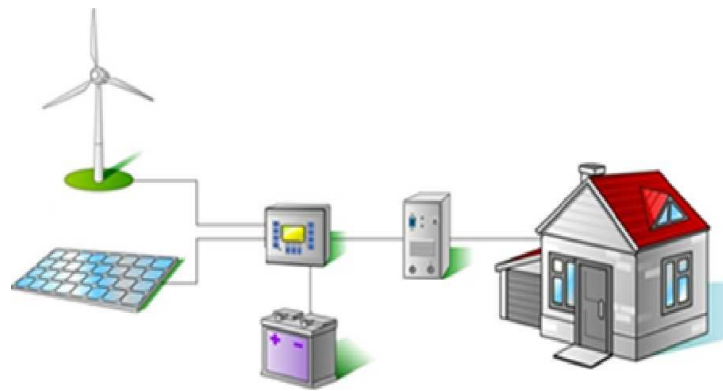


Рис. 1.9. Обладнання для використання вітрогенератора та сонячних батарей [60]

Універсальним приладом, який задовольняє потреби низькотемпературних систем опалення, гарячого водопостачання та вентиляції, є тепловий насос (рис. 1.10), який використовує поновлювальну низькотемпературну енергію довкілля [61-63]. Але у своїй роботі тепловому насосу потрібно використовувати електричну енергію (наприклад, при витраті 2,5 кВт електричної енергії можна отримати 10 кВт теплової енергії). Використання теплового насоса доцільно поєднати з іншими альтернативними джерелами енергії.

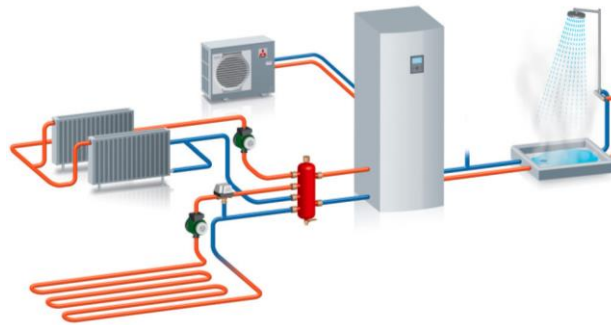


Рис. 1.10. Застосування енергії теплових насосів у побуті

Робота пасивних систем використання відновлювальних джерел енергії заснована виключно за рахунок низки архітектурних прийомів, що забезпечують вільний рух повітря в приміщенні; надходження сонячної енергії до будівлі в холодний період і захист внутрішнього простору від перегрівання влітку; пом'якшення впливу довкілля на будівлю; взимку відокремлення внутрішнього середовища від зовнішнього; улітку забезпечення тяги повітря через будівлю із забором прохолодного повітря із тіньових зон; накопичення теплової енергії в товщі архітектурних конструкцій.

Одним із таких прикладів є застосування «буферних зон», які можна розташувати як по периметру (скляні двори, веранди, лоджії, оранжереї), так і всередині будинку (відкриті або закриті світлопрозорі покриття внутрішніх двориків). У сучасній архітектурі як засіб для підвищення комфортності будівлі та архітектурної виразності інтер'єрів поширено використання атриумів, як найбільш ефективного прикладу «буферної зони».

Для поглинання сонячної енергії вдень і обігріву приміщення вночі, а також з ефективністю економії енергії на опалення до 10% використовується архітектурний елемент – стіна Тромба-Мішеля (рис. 1.11, а), яка закрита подвійним склінням [64], [65].

Прибудовані теплиці або зимові сади (рис. 1.11, б) забезпечують накопичення енергії для опалення вночі та в похмурі дні, застосовуючи масивні перекриття та

масивні темні внутрішні стіни, створюючи тепловий бар'єр між внутрішніми приміщеннями та зовнішнім кліматом, зменшуючи тепловтрати поверхонь, що контактують із зовнішнім середовищем, і сприяють забезпеченню природної вентиляції внутрішніх приміщень, що зменшує споживання енергії [66-68]. Уночі та в похмурі дні взимку теплиці опалюються за рахунок повітрообміну з внутрішнім повітрям приміщення, яке туди подається за допомогою вентиляторів.

Окремим архітектурним елементом, що добре накопичує тепло, особливо в разі застосування не тільки гравію, але й ефективних накопичувачів сонячної енергії (вода та глауберова сіль), виступають акумулятори сонячної енергії.

Для попереднього підігрівання/охолодження припливного повітря використовують ґрунтові повітряні теплообмінники, які влітку використовується для вилучення тепла з будівлі або споруди, та передачі його ґрунту, а взимку навпаки [69-72] (рис. 1.11, в).

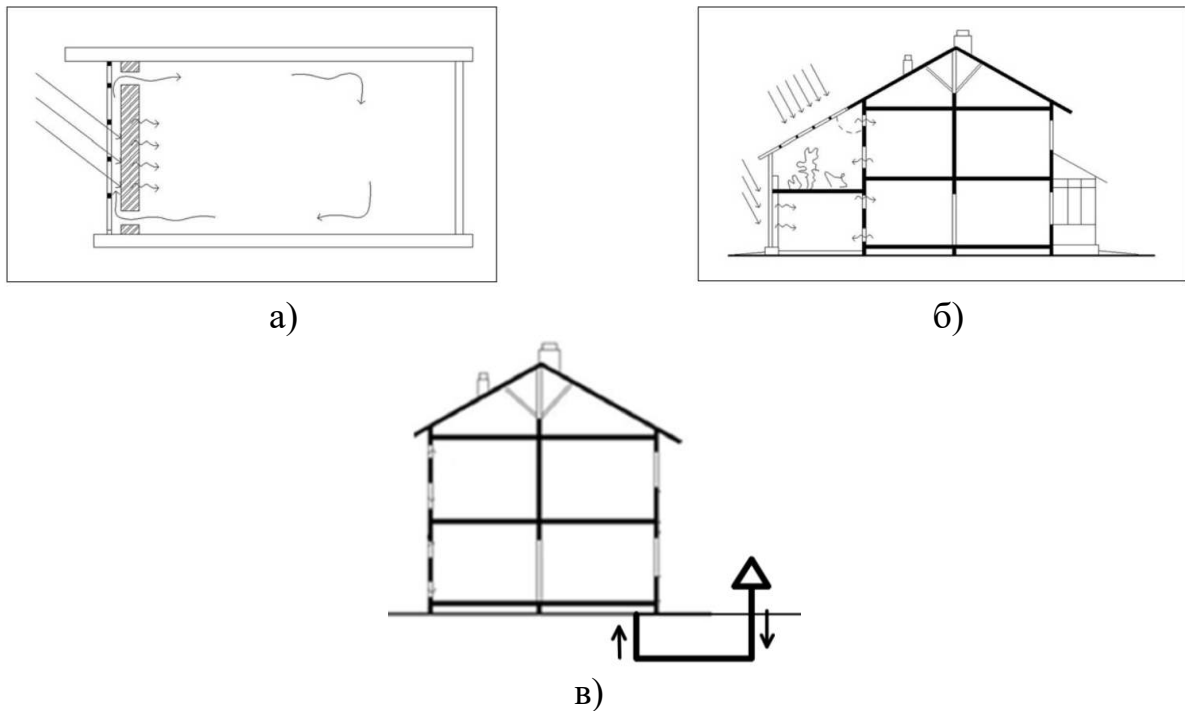


Рис. 1.11. Схеми пасивних систем підтримання параметрів мікроклімату: а –

стіна Тромба-Мішеля; б – прибудований зимовий сад-теплиця ; в – ґрунтовий повітряний теплообмінник

Як можна побачити, використання відновлювальних джерел енергії в енергоощадному будинку може повністю задовольнити витрати на потреби систем підтримання параметрів мікроклімату. До таких систем можна віднести системи опалення та вентиляції (рис. 1.12).

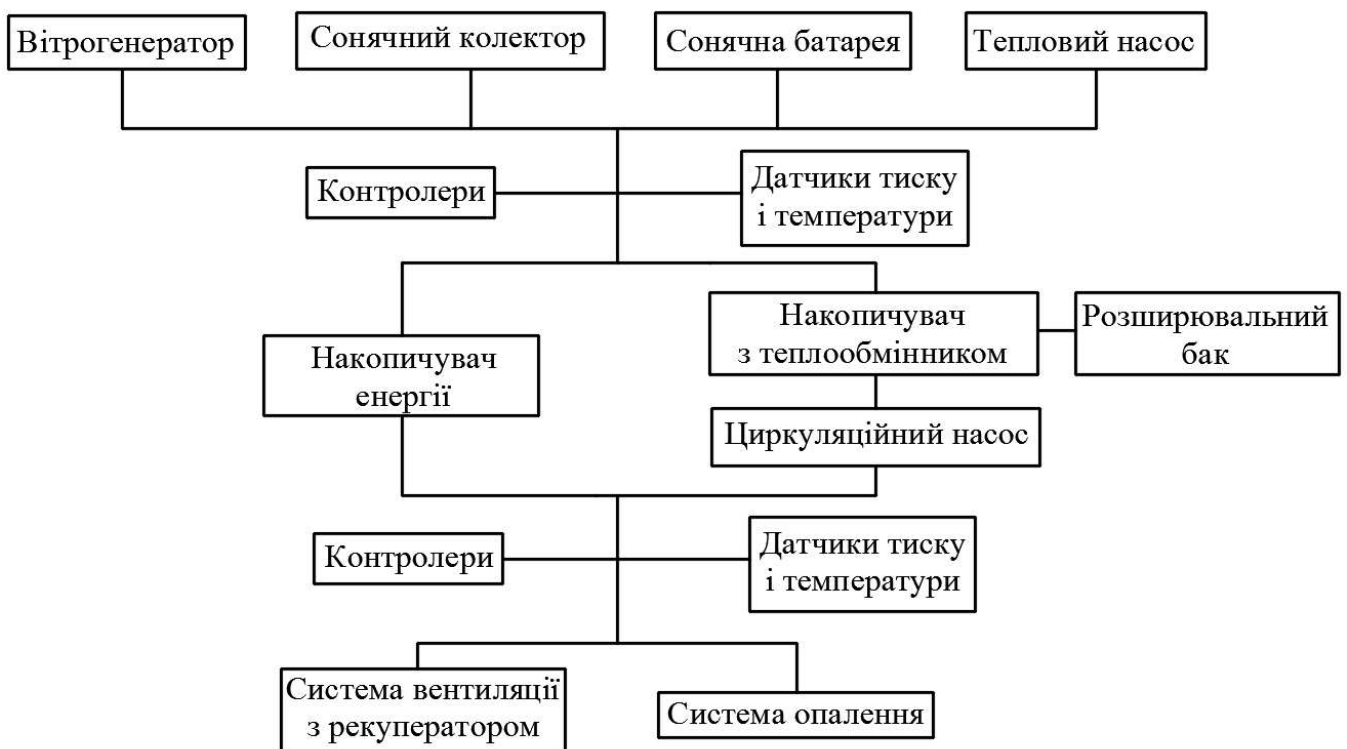


Рис. 1.12. Блок-схема підключення відновлювальних джерел енергії до систем підтримання параметрів мікроклімату енергоощадного будинку

У системі опалення (рис. 1.13) як джерело енергії застосовують сонячні колектори, теплові насоси або комбіновану (гібридну) систему, у якій живлення відбувається декількома джерелами відновлювальної енергії. Основними елементами таких систем виступають: джерело енергії; накопичувальний бак для теплоносія; система трубопроводів; циркуляційний насос; система підлогового

опалення або радіатори; контролери та датчики для керування системою й оптимізації витрат.

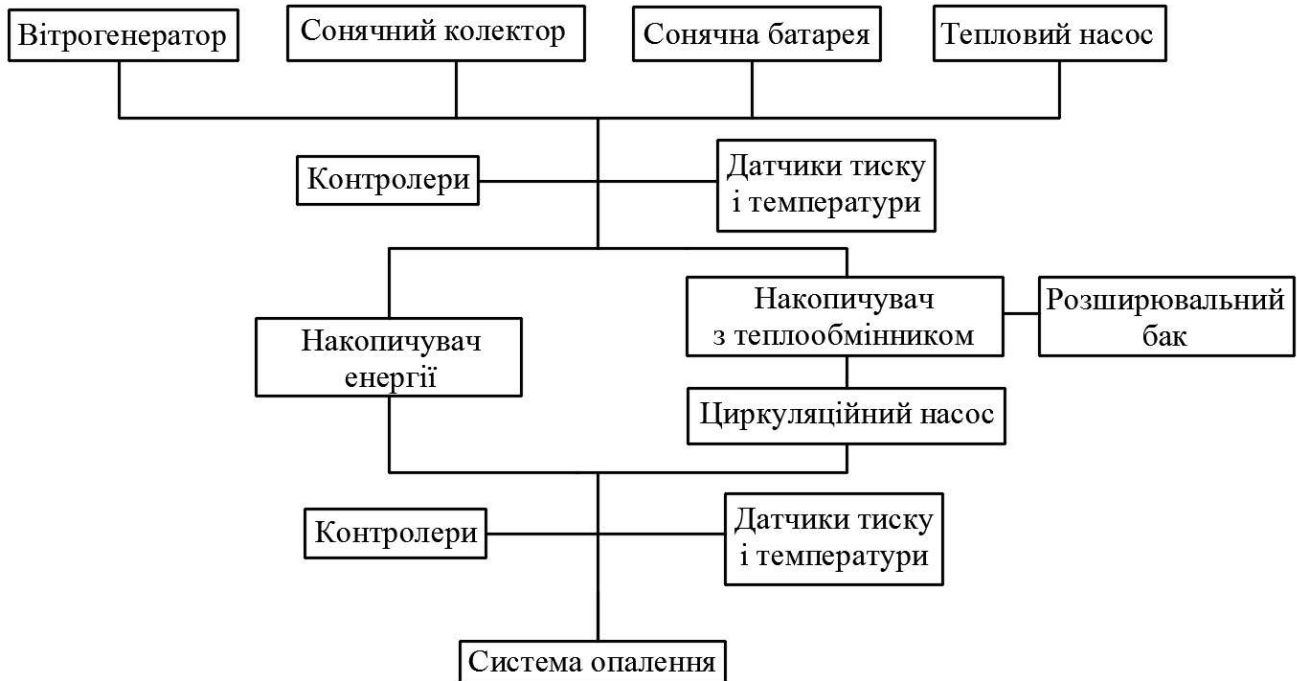


Рис. 1.13. Блок-схема підключення відновлювальних джерел енергії до системи опалення

Однією з найважливіших умов комфортного перебування людей у житлових будинках є наявність чистого свіжого повітря. Тому ключовим інженерним елементом енергоощадного будинку для підтримання параметрів мікроклімату є саме механічна система вентиляції (рис. 1.14). Механічна вентиляція допомагає підтримувати оптимальний рівень вологості та температури в енергоощадних будинках, забезпечуючи постійне подання свіжого чистого повітря (попередньо підігрітого взимку, а влітку охолодженого) до приміщення будинку та видалення використаного повітря із допоміжних приміщень (санітарних вузлів, кухонь, комор), що сприяє створенню здорового мікроклімату для мешканців.

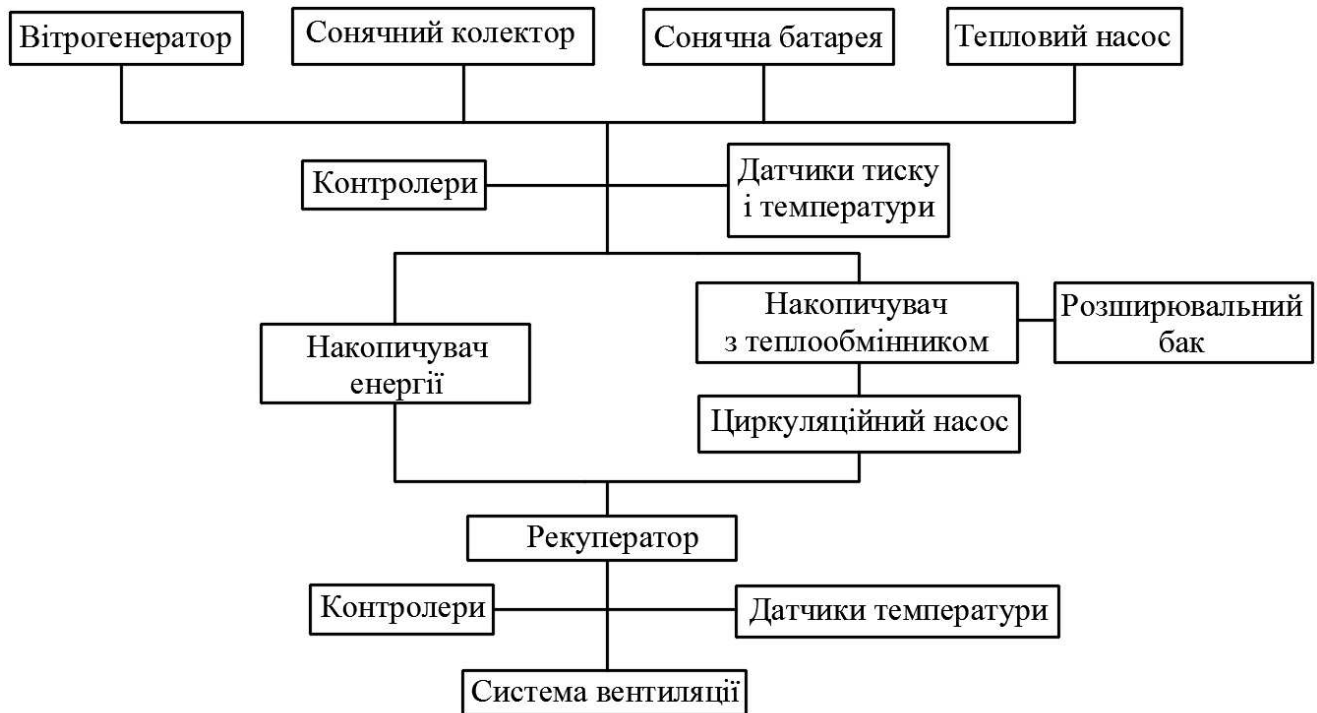


Рис. 1.14. Блок-схема підключення відновлювальних джерел енергії до системи вентиляції

До функцій системи вентиляції входить забезпечення будинку свіжим припливним повітрям, що є дуже важливим з огляду на герметичність оболонки будівлі, видалення або розбавлення концентрації забруднювачів (теплоти, вологи, шкідливих та інших забруднюючих речовин) до граничних значень з метою підтримання допустимих санітарно-гігієнічних і метеорологічних параметрів. Згідно з [73] для здорової людини необхідно 30 кубів свіжого повітря на годину. Для того аби отримати таку кількість повітря, ураховуючи герметичність енергоощадних будинків (герметичність дозволяє максимально уникнути тепловтрат у будівлі), неможливо обійтися без використання контрольованої припливно-витяжної механічної системи вентиляції.

Система вентиляції енергоощадного будинку складається з кількох ключових елементів: вентилятора; фільтрів; повітропроводів; каналів забору та викиду повітря; датчиків та контролерів. Головним елементом системи вентиляції,

наявність якого стає стандартом для будь-якого типу енергоощадних будинків, є рекуператор тепла [74], [75]. Така система значною мірою знижує споживання енергії на обігрів та охолодження будинку, оскільки для зміни температури попередньо нагрітого або охолодженого повітря потрібні менші додаткові витрати. Хоча використання рекуператорів з ефективністю не нижче 75 % і потребує значних витрат енергії, але вони дозволяють утилізувати понад 90% вихідного тепла.

Аналізуючи наведені системи підтримання мікроклімату в енергоощадних будинках, можна дійти висновків, що всі вони ефективні, але для роботи вентиляторів, насосів і автоматичних контролерів потрібна енергія (електрична або природна). Навіть найсучасніші системи опалення, охолодження та вентиляції, що використовують відновлювальні джерела енергії, потребують енергії для свого функціонування. Обладнання для рекуперації тепла значно знижує втрати енергії, але для його роботи також потрібна енергія. Усе це додаткові витрати, які можуть призвести до зниження класу енергоспоживання будинку. Тому важливо не тільки впроваджувати енергоощадні технології, а й оптимізувати їх використання для мінімізації енергоспоживання.

Одним із засобів мінімізації витрат енергії є впровадження пасивної системи вентиляції з рекуперацією тепла, яка є ефективною з погляду економії енергії й може забезпечити мешканцям будинку комфортні теплові умови та здорове середовище в приміщенні. Пасивна вентиляція забезпечує природний повітрообмін, що знижує потребу в електроенергії для вентиляторів механічної системи вентиляції. Однак, витрати припливного повітря пасивною системою вентиляції може бути недостатньо, щоб задовольнити вимоги щодо витрати свіжого повітря [73]. Причинами незадовільної роботи пасивної системи може бути низько розташована решітка для забору чистого повітря, розташування будинку біля багатоповерхівок або високих дерев і низька швидкість зовнішнього повітря, яка не має можливості створити потрібний тиск для потрапляння повітря до системи вентиляції. Для уникнення цих проблем та для підвищення ефективності природного повітрообміну до складу пасивної системи вентиляції впроваджують

додатковий елемент – вітровловлювач (рис. 1.15), який має здатність забезпечити приплив свіжого повітря, видалення тепла, вологи та забруднювальних речовин із будівлі, використовуючи лише природні сили вітру та теплової плавучості [76]. Конструкція та принцип роботи вітровловлювача дозволяють підвищити ефективність процесу вітровловлювання для систем вентиляції навіть у будинках, розташованих у місцях, де спостерігається часта зміна напрямків руху та швидкості вітру [78], [79].



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.15. Традиційні вітровловлювачі Близького Сходу: а – Катар; б – Ірак; в – Іран; г – Бахрейн

Цей традиційний архітектурний елемент вловлює прохолодне повітря на висоті над будівлею [79], [80], спрямовує його в приміщення й виводить тепле

повітря назовні, використовуючи природну циркуляцію. Вітровловлювач працює за рахунок різниці тиску повітря, що виникає під впливом вітру. Це вертикальна шахта, що відкривається назовні у верхній частині будівлі, й може містити внутрішні канали для розподілення повітря. Через відсутність потреби в електроенергії, вітровловлювачі є екологічно чистим і економічно вигідним рішенням для підтримки комфортного мікроклімату в будівлі, яке призводить до зниження залежності від електроенергії при забезпеченні необхідної вентиляції.

1.3. Схемні рішення систем забезпечення параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках

Для нормального самопочуття людини санітарно-гігієнічними нормами визначаються необхідні метеорологічні умови, що мають підтримуватися у приміщеннях житлових, громадських та адміністративних будівель. До метеорологічних параметрів внутрішнього повітря відносять температуру t , $^{\circ}\text{C}$; відносну вологість ϕ , %; швидкість V , м/с. Від значень параметрів внутрішнього повітря приміщень залежить енергоспоживання в системах опалення та вентиляції.

Оптимальні параметри мікроклімату – це сукупність показників мікроклімату, за якими зберігається теплова рівновага в організмі й відсутнє напруження в його системі терморегуляції, а отже, відчуття комфорту не менше ніж у 80 % людей, що знаходяться у приміщенні.

Допустимі параметри мікроклімату – це сукупність кількісних показників мікроклімату, при якій при продовжуваному й систематичному впливу на людину можуть виникати зміни теплового стану організму, що супроводжуються напруженням у його системі терморегуляції, але які не виходять за межі фізіологічних властивостей і швидко нормалізуються. При цьому не виникає пошкоджень або порушень стану здоров'я, але можуть мати місце дискомфортні теплові відчуття, погіршення самопочуття та зниження працездатності [81].

Згідно з [82], мікроклімат приміщення має вплив на здоров'я, продуктивність та комфорт людей, які перебувають у приміщенні. Цим стандартом установлюються будівельні вимоги до мікроклімату громадських і житлових будівель і визначається мікроклімат приміщення як «стан внутрішнього середовища приміщення, що впливає на людину». Мікроклімат приміщення характеризується, зазвичай, температурою, вологістю й рухливістю повітря. Усі ці параметри мікроклімату в приміщеннях можна як вимірювати, так і регулювати.

Для того, щоб житло було максимально комфортним для проживання, потрібно приділити важливу увагу вибору систем забезпечення параметрів мікроклімату. Сучасні технології будівництва дозволяють будувати енергоощадні будинки, здатні зберігати всередині будинку задані параметри мікроклімату, незалежно від умов довкілля. Навіть будинок із тонкими стінами буде теплим у люті морози з мінімальними енергозатратами на обігрів, якщо вставити якісні склопакети та входні двері, тим самим усуваючи містки холоду.

Опалення – це одна з основних складових комфортного будинку, до складу якої входять засоби для отримання, транспортування й передавання теплоти в усі приміщення, що обігріваються [83]. У сучасному будівництві все частіше використовують передові технології для опалення, хоча традиційні способи також актуальні. Багатоваріантність принципів схем, функціональних і технічних характеристик роблять класифікацію систем опалення розгалуженою. За типами опалення можна розділити на водяне, повітряне, електричне та газове.

Вода широко використовується як теплоносіє у системах опалення, що обумовлене її перевагами. Тому класичним видом опалення є водяне опалення будинку (рис. 1.16), яке є замкненою системою, у якій вода нагрівається котлом та трубопроводами проходить до радіаторів, через які відбувається передача тепла повітрю, і вже охолодженою повертається назад. До основних складових такої системи належать: котли (електричні, газові, рідинно- та твердопаливні), трубопроводи, радіатори.

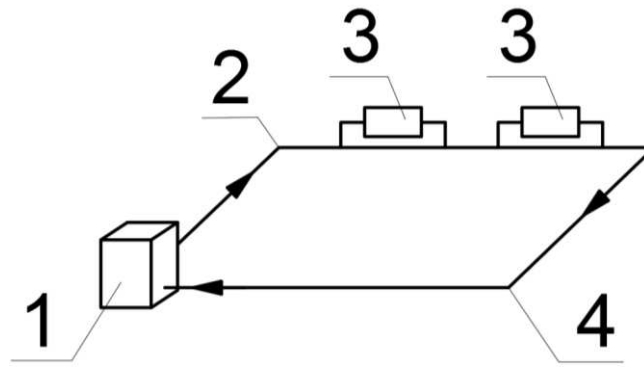


Рис. 1.16. Класична схема водяного опалення: 1 – нагрівач води; 2 – трубопровід гарячої води; 3 – опалювальний прилад; 4 – трубопровід охолодженої води

При повітряному опаленні повітря надходить до теплообмінника установки для нагрівання повітря та рухається повітропроводами, тим самим нагріваючи повітря в приміщенні [84]. Принцип роботи повітряного і водяного опалення засновані на передачі тепла приміщенням шляхом охолодження теплоносія. Джерелом нагрівання системи повітряного опалення є центральна установка для нагрівання повітря (теплогенератор) і канали для переміщення теплоносія (теплопроводи).

Відмінністю від водяного опалення є відсутність опалювальних приладів, а обігрів відбувається за рахунок передавання акумульованого тепла гарячим повітрям безпосередньо приміщенню, що опалюється, змішуючись із внутрішнім повітрям (рис. 1.17). Повітряне опалення можна поєднати з припливною вентиляцією, одночасно забезпечуючи рухливість повітря й рівномірність температури та санітарно-гігієнічні показники повітряного середовища приміщення.

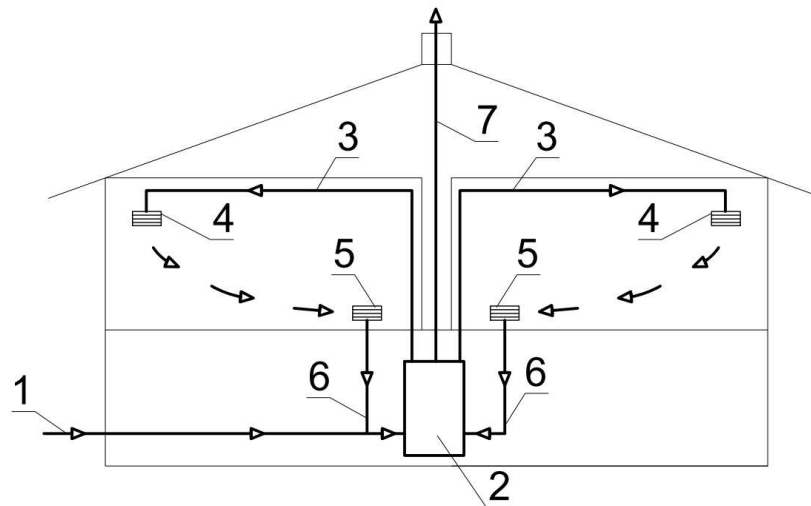


Рис. 1.17. Схема повітряного опалення: 1 – повітропровід припливного повітря; 2 – джерело теплової енергії; 3 – повітропровід нагрітого повітря; 4 – припливна вентиляційна ґратка; 5 – витяжна вентиляційна ґратка; 6 – рециркуляційний повітропровід; 7 – димова труба

Реалізація повітряного опалення відбувається двома способами: природна рециркуляція (рух повітря відбувається за рахунок різниці температур) і примусова рециркуляція (рух повітря повітропроводами відбувається за допомогою вентилятора). Джерелом теплової енергії може виступати камін з повітропроводами, тепловий насос з фанкойлами, звичайний кондиціонер.

Для опалення будинків широко застосовується газове опалення. Системи газового опалення можуть бути обладнані газовими опалювальними печами, газовими камінами, газовими водонагрівачами, газовими повітронагрівачами, газовими інфрачервоними випромінювачами. Останніми роками простежується тенденція щодо зниження популярності використання газового опалення. Це пов'язано з великими витратами на обладнання, підведення та дозвільні документи.

Електрична система опалення працює за принципом перетворення електричної енергії в теплову та регулюється механічним способом або за допомогою програми «розумний дім» [85], [86]. Елементи електричного опалення можуть встановлюватися на підлозі, стелі, стінах або як мобільний електроприлад.

До основних типів опалення належать (рис. 1.18) системи теплої підлоги, електроконвектори та інфрачервоні обігрівачі.

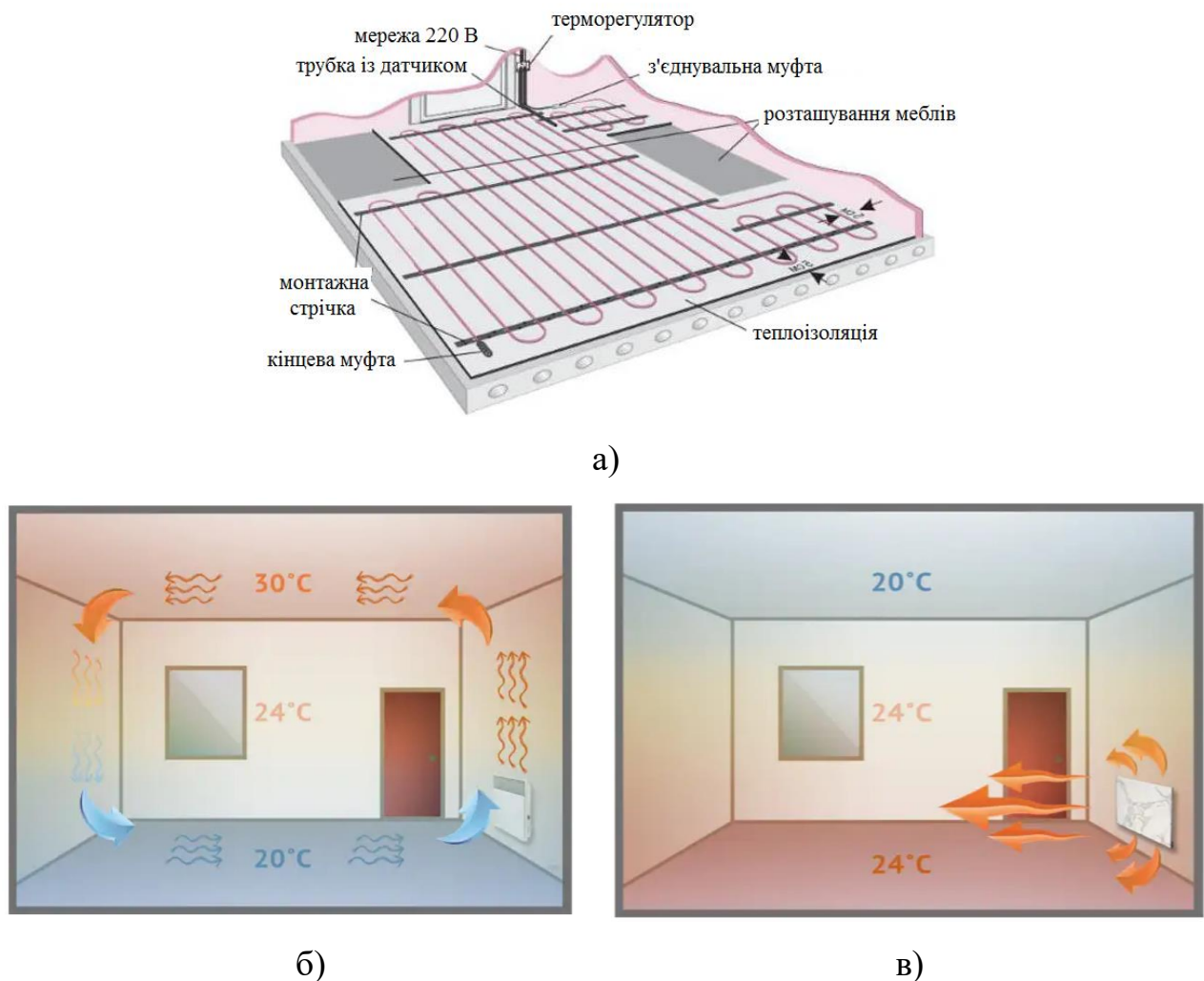


Рис. 1.18. Електричне опалення: а – система теплої підлоги; б – електричні конвектори; в – інфрачервоні обігрівачі

Системи вентиляції застосовуються для видалення надлишкового тепла, вологи, шкідливих домішок та забезпечення надходження свіжого зовнішнього повітря, з метою підтримання нормативних метеорологічних, санітарно-гігієнічних та технологічних параметрів повітряного середовища у приміщеннях.

Природне провітрювання забезпечується надходженням зовнішнього повітря крізь нещільності в огороженнях, являє собою найпростіший спосіб вентиляції і

залежить від різниці тисків зовнішнього та внутрішнього повітря (неорганізований повітрообмін). До організованого повітрообміну належить природна й механічна вентиляція.

Вплив природної вентиляції на якість повітря та тепловий комфорт у приміщенні досліджували В. Н. Богословський, Р. В. Щекін, А. Я. Ткачук та інші. Природна вентиляція працює під дією гравітаційного та вітрового тиску, тобто переміщення повітря відбувається внаслідок різниці температур зовнішнього (атмосферного) і внутрішнього повітря приміщення; внаслідок різниці тисків у приміщенні, що обслуговується, та витяжним пристроєм (дефлектором), розташованим на покрівлі будинку; у результаті впливу вітрового тиску (рис. 1.19).

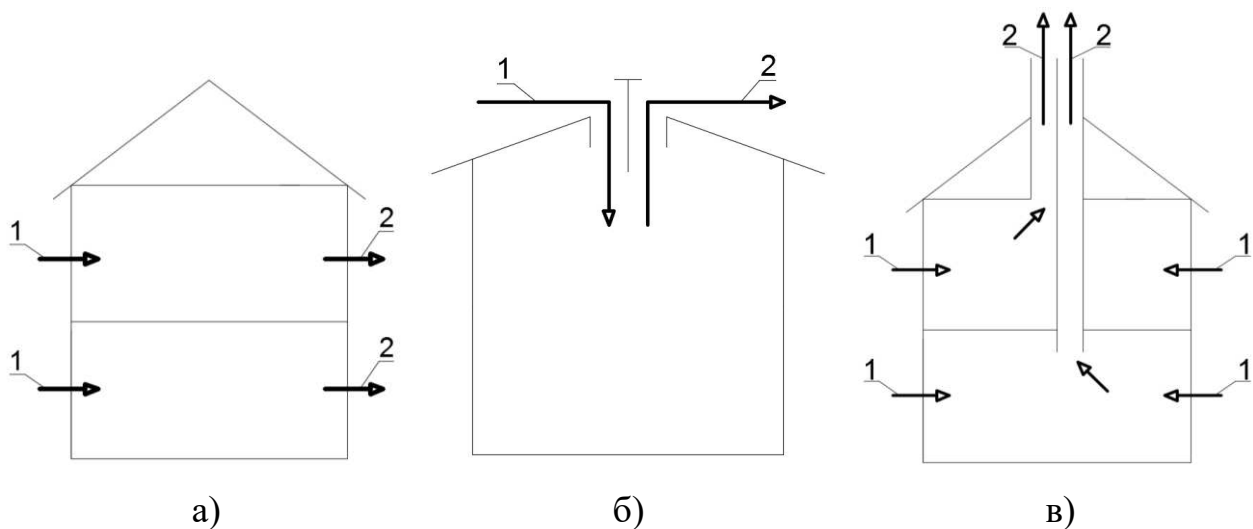


Рис. 1.19. Природна вентиляція: а – наскрізна; б – вітряна башта; в – вертикальні канали; 1 – припливне повітря; 2 – повітря, що видаляється

Природна вентиляція відбувається через негерметичність огорожувальних конструкцій будівлі, тобто за рахунок інфільтрації повітря через нещільності огорожувальних конструкцій, тому, через стрімку зміну зовнішньої температури та швидкості вітру, коли під час вітряної погоди в будинку з'являються протяги, які призводять до великої втрати тепла, вона вважається незадовільною та збитковою для мешканців.

Тому для регулярного, гарантованого й достатнього повітрообміну потрібно використовувати контрольовану, зручну в керуванні механічну вентиляцію (рис. 20), яка для забезпечення якості повітря в житлових будинках за рахунок видалення несвіжого й подавання свіжого чистого повітря використовує спеціальне обладнання та прилади (нагрівачі повітря, фільтри, вентилятори, електродвигуни, пиловловлювачі тощо). Це устаткування дозволяє переміщати на значні відстані, піддавати різним видам обробки (очищення, зволоження і т.п.), подавати й видаляти повітря з приміщень у необхідній кількості незалежно від умов навколишнього повітряного середовища. У зв'язку з таким різноманіттям можливостей механічної вентиляції, суттєво підвищується витрата електроенергії під час її використання, яка залежить від складності й розмірів системи.

Для забезпечення ефективного повітрообміну в будинку в систему механічної вентиляції гармонійно вписалася припливно-витяжна установка, яка дозволяє контролювати приплив свіжого та видалення відпрацьованого повітря, що особливо важливо для енергоощадних будинків. Завдяки цьому система забезпечує стабільний мікроклімат, оптимальний рівень вологості та якість повітря. А для підвищення енергоефективності системи в припливно-витяжну установку потрібно інтегрувати рекуператор тепла – пристрій, який передає тепло від витяжного повітря припливному. Отже, інтеграція припливно-витяжної установки з рекуператором тепла є оптимальним рішенням як для класичних, так і для сучасних енергоощадних будинків, яке поєднує комфорт, здоров'я мешканців і значне енергозбереження.

Основним показником енергоефективності будинку є значення питомих тепловитрат на опалення та вентиляцію для досягнення оптимальних параметрів мікроклімату. На підтримання цих параметрів у традиційному будинку потрібні великі енерговитрати на покриття тепловтрат, що складаються з тепловтрат через огорожувальні конструкції й вентиляцію, які можуть досягати 350 кВт/год з квадратного метра опалювальної площі на рік. У той час як в енергоощадному будинку відбувається мінімізація втрат тепла завдяки герметичності та високому

коефіцієнту теплового опору огорожувальних конструкцій (використання теплоефективних матеріалів, вікон з високим рівнем енергоефективності, ергономічної конструкції дому, застосування якісних утеплювачів тощо).

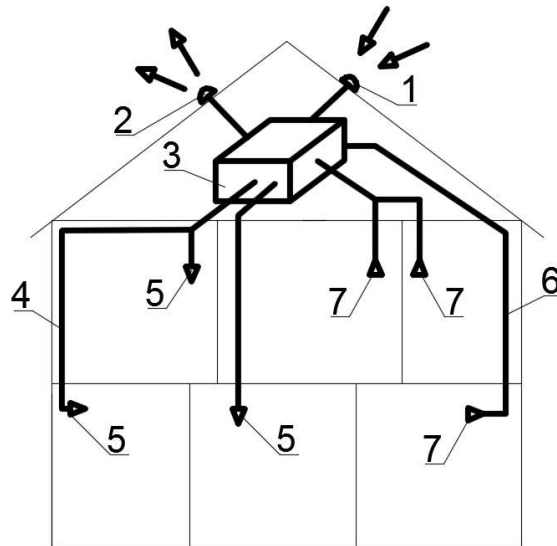


Рис. 1.20. Конструктивна схема припливно-витяжної вентиляції будівлі: 1 – повітрязабірний пристрій; 2 – витяжний пристрій; 3 – припливно-витяжна установка з рекуператором; 4 – припливний повітропровід; 5 – повітророзподільна ґратка; 6 – витяжний повітропровід; 7 – витяжна ґратка

Концепція енергоощадного будинку притерпілася деяких змін завдяки активному розвитку альтернативної енергетики. Тепер енергоощадний будинок розглядається як енергонезалежне житло завдяки використанню одного або комбінації декількох видів джерел відновлюваної енергії в одній системі (сонячна [87], вітрова, геотермальна енергія).

Одну з ключових ролей у надійному забезпеченні систем опалення та вентиляції відіграють теплові насоси, чия популярність зростає завдяки надійності та енергоефективності [88-90]. Теплові насоси використовують відновлювальні джерела енергії, такі як повітря, ґрунт або вода, що робить їх безпечними для довкілля та дешевими у використанні, забезпечують комфортну температуру в

будинку та дозволяють зменшити енерговитрати на підтримання параметрів мікроклімату. Для передавання низькопотенційного тепла до систем, які відповідають за керування параметрами мікроклімату, використовуються різні шляхи передавання: «вода-вода», «повітря-повітря», «повітря-вода», «розсіл-вода» (рис. 1.21).

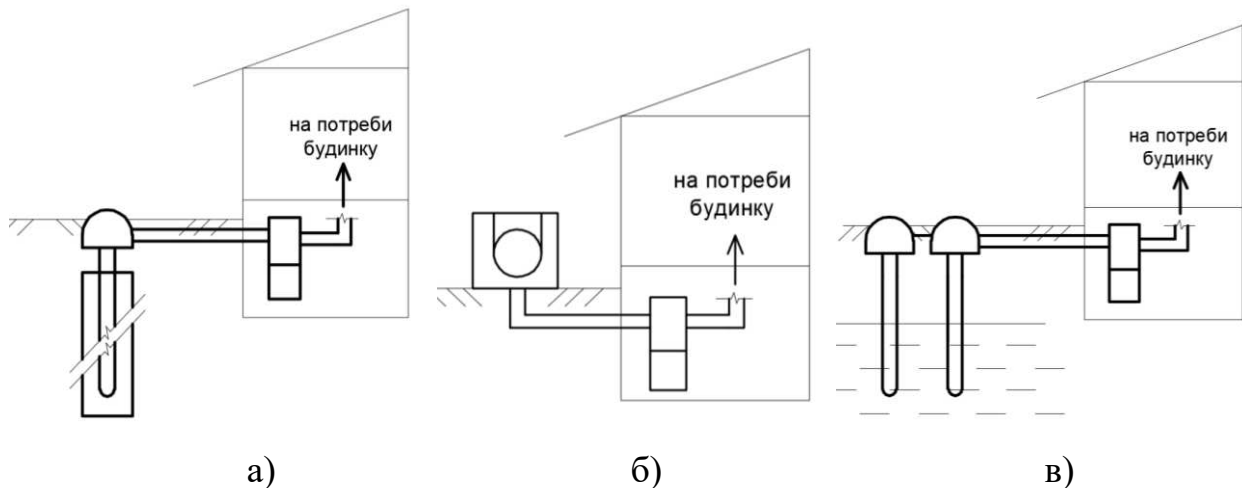


Рис. 1.21. Шляхи передавання низькопотенційного тепла від: а – ґрунту; б – повітря; в – води

Бюджетним варіантом добування енергії Сонця в енергоощадних будинках є сонячні колектори (рис. 1.22). Сонячні колектори монтуються на дахах або фасадах будинку та використовують енергію Сонця або при перетворенні її на електроенергію для живлення різних систем у будинку, або при нагріванні теплоносія (води або незамерзаючої рідини) для потреб систем опалення та вентиляції.

Через зміну погодних умов виробництво електроенергії для потреб будинку сонячними панелями (перетворюють енергію Сонця) та вітрогенераторами (перетворюють кінетичну енергію вітру) може бути непостійним. Тому для стабільного й безперервного постачання електрики системам опалення та вентиляції, для підтримки їхньої ефективної роботи застосовують накопичувачі

енергії (акумуляторні батареї), які використовують накопичену в періоди сонячної активності або сильного вітру надлишкову енергію в періоди, коли виробництво енергії знижується.

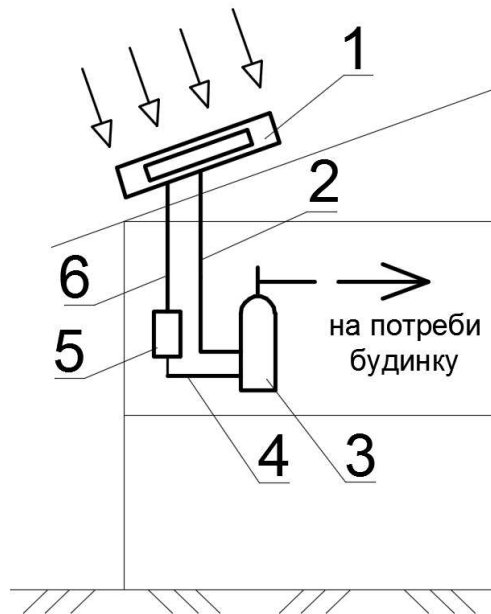


Рис. 1.22. Схема роботи сонячного колектора: 1 – сонячний колектор; 2 – нагрітий теплоносій; 3 – бойлер; 4 – теплоносій (вода або незамерзаюча рідина); 5 – насосна група, блок контролю та керування; 6 – охолоджений теплоносій

Системи опалення та вентиляції використовуються для створення комфортних умов у будинку, контролюючи, за допомогою електричної або природної енергії, температуру, вологість та якість повітря. Наприклад, опалювальні системи використовують енергію для збереження тепла в холодний період року, а вентиляційні системи потребують енергії для забезпечення будинку припливним свіжим повітрям. Отже, процеси підтримання мікроклімату в будинку безперервно пов'язані з енерговитратами, які залежно від температурних параметрів зимового періоду можуть суттєво збільшуватись, що призводить до збільшення енергоспоживання будівлі, а це, своєю чергою, впливає на категорію енергоспоживання. Якщо ж ці системи неефективні або використовуються надто

інтенсивно, це може вплинути, як на експлуатаційні витрати, так і на зниження класу енергетичної ефективності будівлі.

Для підвищення енергоощадності будинку необхідно впроваджувати передові технології, спрямовані на зменшення споживання енергії. Це включає використання енергоефективних систем опалення, вентиляції та впровадження пасивної вентиляції [91]. Альтернативним пристроєм пасивної вентиляції є вітровловлювач, який може не тільки гармонійно вписатися в архітектурний облік будівлі, а й бути інтегрованим у наявну систему вентиляції [79], [92], [93].

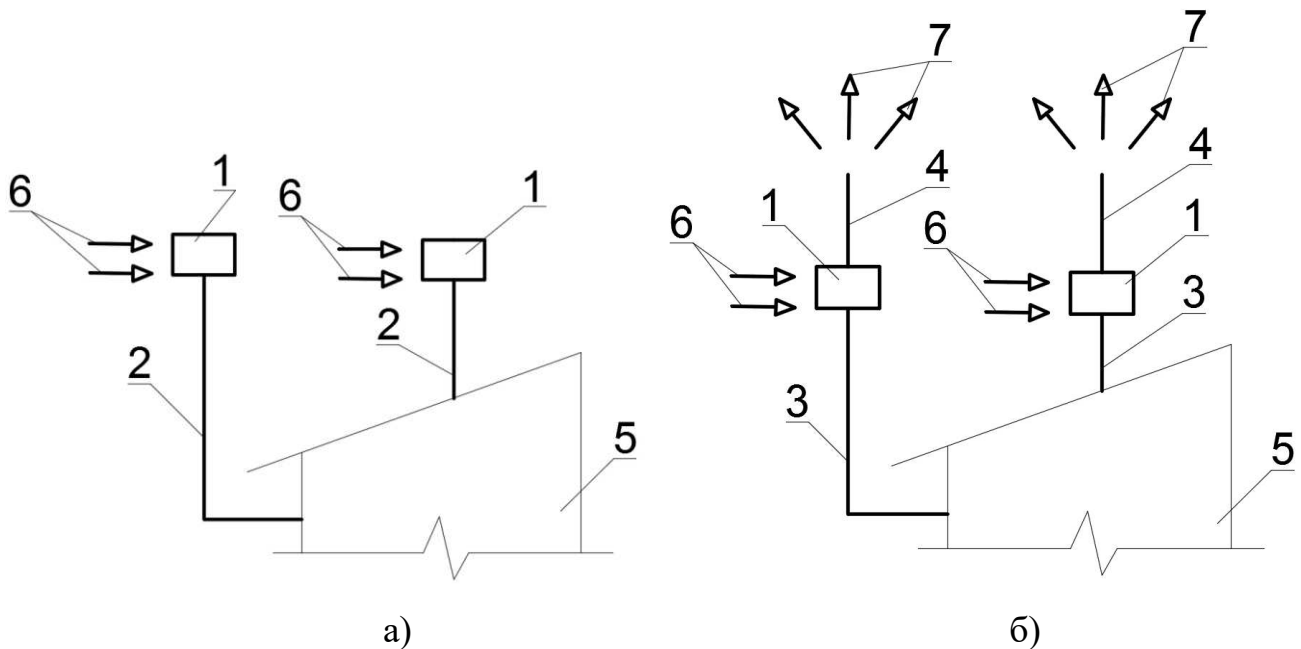


Рис. 1.23. Інтегрування вітровловлювача в систему вентиляції (збоку стіни або даху): а – вітровловлювач; б – вітровловлювач з витяжним повітропроводом; 1 – вітровловлювач; 2 – припливний повітропровід; 3 – припливно-витяжний повітропровід; 4 – витяжний повітропровід; 5 – будівля; 6 – припливне повітря; 7 – витяжне повітря

Використання вітровловлювачів у поєднанні з обладнанням для рекуперації тепла забезпечує стабільне подавання свіжого повітря й комфортний мікроклімат у будинку з мінімальними втратами тепла, що особливо важливо в холодну пору року,

допомагає підтримувати здоровий рівень вологості та знижує ризик утворення цвілі. Вітровловлювачі можуть бути запроєктовані в новобудові або під'єднані до вже наявної системи вентиляції будинку на даху або на стіні для максимального вловлювання вітрового потоку. Це сприяє більш рівномірному розподіленню свіжого повітря по всьому будинку й покращує якість повітря та комфорт для мешканців [94]. Крім того, використання вітровловлювачів знизить рівень шуму від механічного вентилятора, забезпечуючи тиху й заспокійливу атмосферу в будинку [92], [95].

1.4. Сучасний стан пасивних систем підтримання параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках

Надмірне споживання енергії механічним та електричним обладнанням, призначеним для забезпечення комфортних параметрів мікроклімату, стало серйозною проблемою в сучасних будинках. Використання потужних систем опалення, кондиціонування та вентиляції часто призводить до непропорційного споживання енергії, що значно підвищує витрати на комунальні послуги й негативно впливає на довкілля. Ця ситуація призвела до того, що багато сучасних будинків стали непропорційно залежними від енергії для підтримання комфортних умов проживання. Це не тільки збільшує витрати мешканців на оплату комунальних послуг, але й сприяє збільшенню викидів парникових газів, що негативно впливає на кліматичну ситуацію на планеті.

Ефективним рішенням для зниження непропорційного споживання енергії на підтримання параметрів мікроклімату в приміщеннях у різних типах будівель є використання природної вентиляції [96–104]. Природна вентиляція рекомендована як заміна механічної вентиляції та кондиціонування повітря, щоб зменшити енергоспоживання будівлі та викиди вуглецю. Рушійними силами природної вентиляції є вітер і плавучість. Різниця в тиску вітру вздовж фасаду та різниця між внутрішньою та зовнішньою температурами створюють природний повітрообмін

між внутрішнім та зовнішнім повітрям, тому воно навіть не транспортується, а просто рухається завдяки фізичним законам. Швидкість вентиляції залежить від сили та напрямку цих сил і опору шляху потоку.

Успішне впровадження природної вентиляції залежить від кількох важливих чинників, таких як безпосередній міський контекст (або ландшафт міської забудови) [105–108], тип будівлі [109], план поверху [110], якість навколишнього повітря [111–115] та рівень шуму [95]. Деякі з цих чинників ураховуються під час проєктування, а інші – під час щоденної роботи.

Повітрообмін природної вентиляції відбувається:

- за рахунок різниці температур та/або тисків внутрішнього й зовнішнього повітря, а також під дією вітру – неорганізована природна вентиляція; у холодні та перехідні періоди року зовнішнє холодніше повітря виштовхує тепле внутрішнє повітря через фрамуги, кватирки, вікна;

- під дією гравітації та вітрового тиску – організована природна вентиляція. Одним із прикладів є канална система природної витяжної вентиляції, до складу якої входять витяжні ґратки приміщень, для регулювання витрати повітря, що видаляється; повітропровід, який виводиться вище даху будівлі; захисний зонтик від опадів або дефлектор для збільшення ефективності природної вентиляції за рахунок вітрового тиску.

Порівнюючи природну вентиляцію із системами кондиціонування повітря, продуктивність і охолоджувальна здатність можуть виглядати обмеженими, а її ефективність не завжди стабільна. Але навіть за таких умов природна вентиляція [116]:

- може заощадити до 40% споживання енергії при використанні замість механічної вентиляції залежно від місцевого клімату;

- дає можливість людині почуватися комфортно в широкому діапазоні температур завдяки концепції адаптивного теплового комфорту, яка враховує можливості пристосування людини до різних температурних умов у приміщеннях і

контролю середовища навколо себе (наприклад відчинення або зачинення вікон) [117], [118], [119];

- підвищує продуктивність мешканців завдяки зниженню концентрації вуглекислого газу й покращенню теплового комфорту [120].

За принципом розташування припливних отворів природну вентиляцію можна класифікувати на:

- односторонню вентиляцію (природний рух повітря відбувається за рахунок розміщення одного або декількох вентиляційних отворів на одному боці будівлі) [121], [122], [123], [124] (рис. 1.24);

- перехресну вентиляцію (природний рух повітря відбувається за рахунок розташування вентиляційних отворів на протилежних боках будівлі) [124], [125] (рис. 1.25, 1.26);

- вітряні вежі (природний рух повітря відбувається за рахунок розташування вентиляційних отворів на різних висотах) [126], [127], [128] (рис. 1.27).

Основними параметрами, що впливають на потік повітря при односторонній природній вентиляції, є сила вітру, різниця температур між внутрішнім простором та зовнішнім середовищем (плавучість), яка спричиняє різницю щільності, де внутрішнє тепле повітря менш щільне, ніж припливне, комбінація сили вітру та різниця температур [129], [130]. У результаті між зовнішнім та внутрішнім повітрям виникає різниця тиску, при якому припливне повітря буде надходити в нижню частину вікна (нижній отвір), а внутрішнє повітря буде видалятися з верхньої частини вікна (верхнього отвору) [122], [131] (рис. 1.24). Однак можливість односторонньої природної вентиляції шляхом відчинення вікна обмежена, особливо у випадку щільної забудови малоповерховими будинками та в умовах слабого вітру.

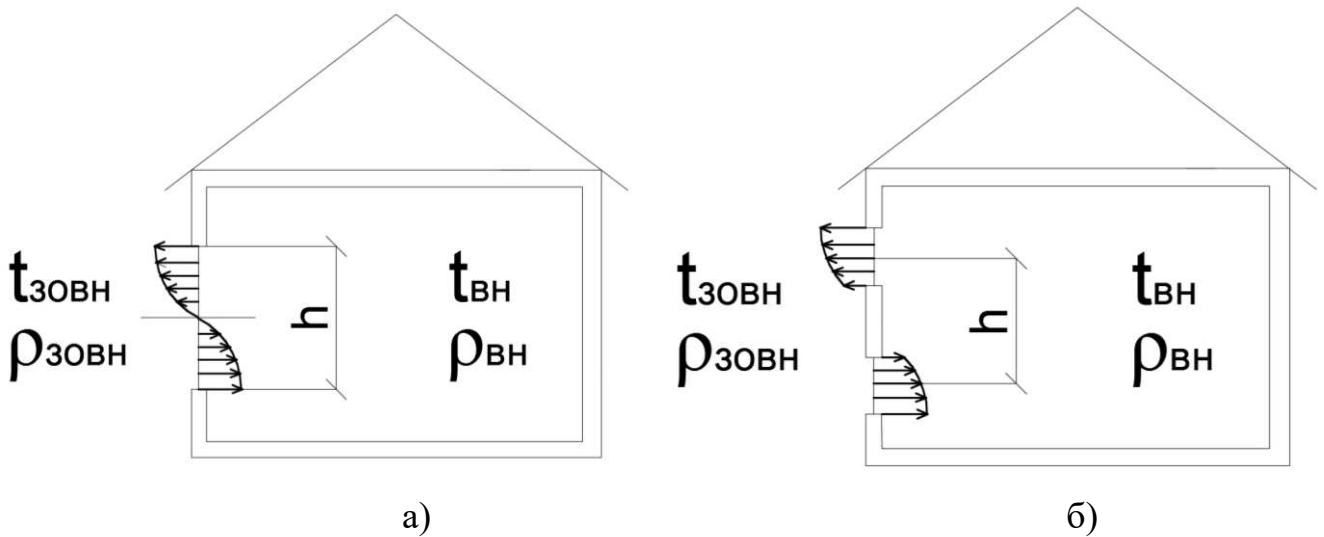
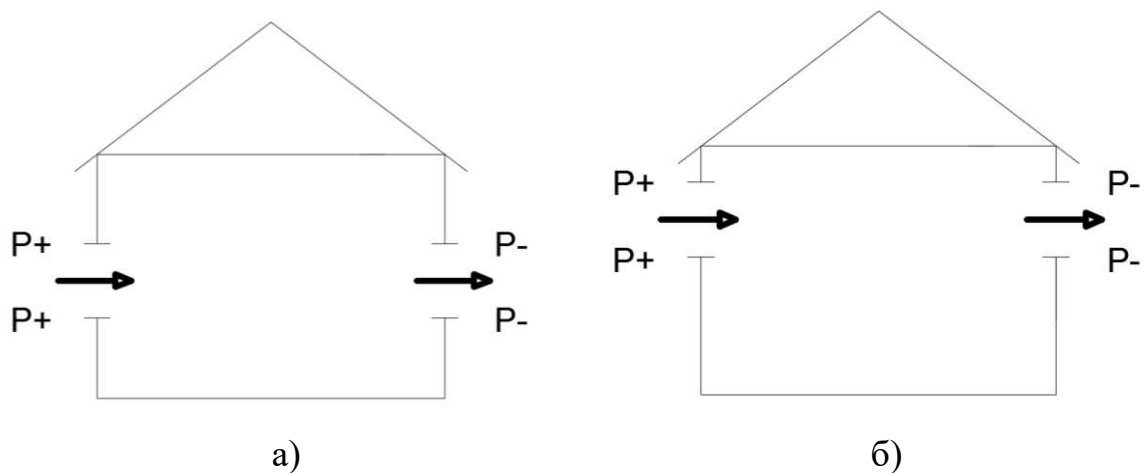


Рис. 1.24. Розподіл внутрішнього та зовнішнього потоку односторонньої вентиляції з одним отвором (а) та з кількома отворами (б)

Перехресна вентиляція вважається більш ефективною, ніж одностороння вентиляція, оскільки вона може краще використовувати переваги градієнта високого тиску навколо будівлі та, зазвичай, викликається вітром, спричиняючи різницю тиску між двома отворами на протилежних фасадах [125], [132] (рис. 1.25).



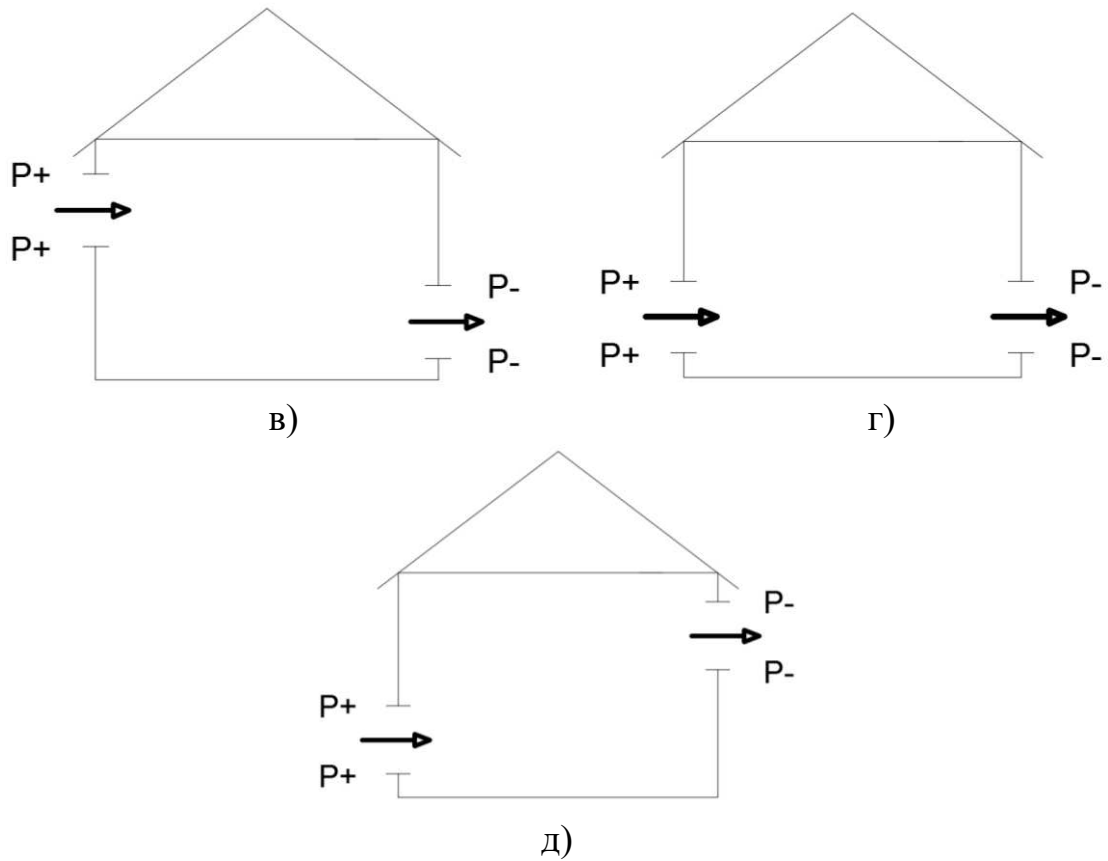
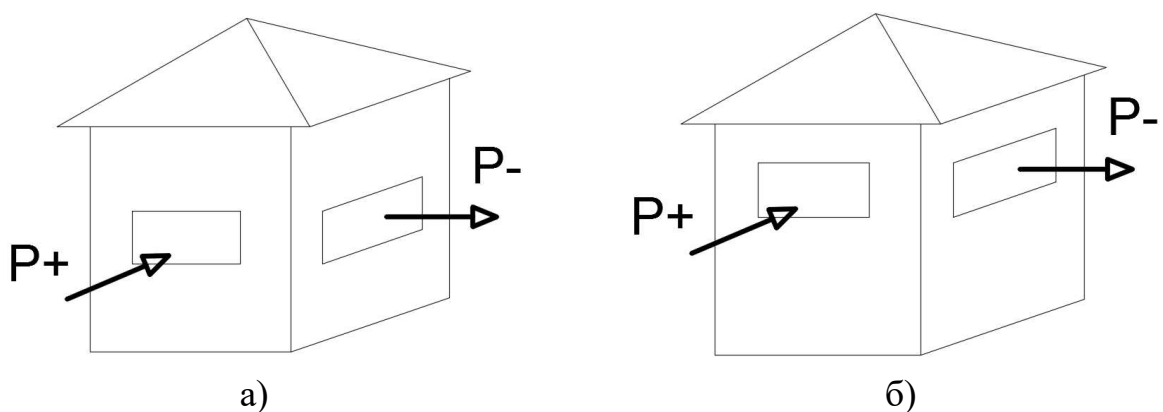


Рис. 1.25. Принципова схема перехресної вентиляції з розташуванням припливного та витяжного отворів: а – по середині; б – в верхній частині будинку; г – припливний отвір вище витяжного; д – в нижній частині будинку; д – припливний отвір нижче витяжного

Своєю чергою, перехресна кутова вентиляція схожа за характером з перехресною вентиляцією й керується різницею тиску вітру між двома отворами сусідніх фасадів (рис. 1.26).



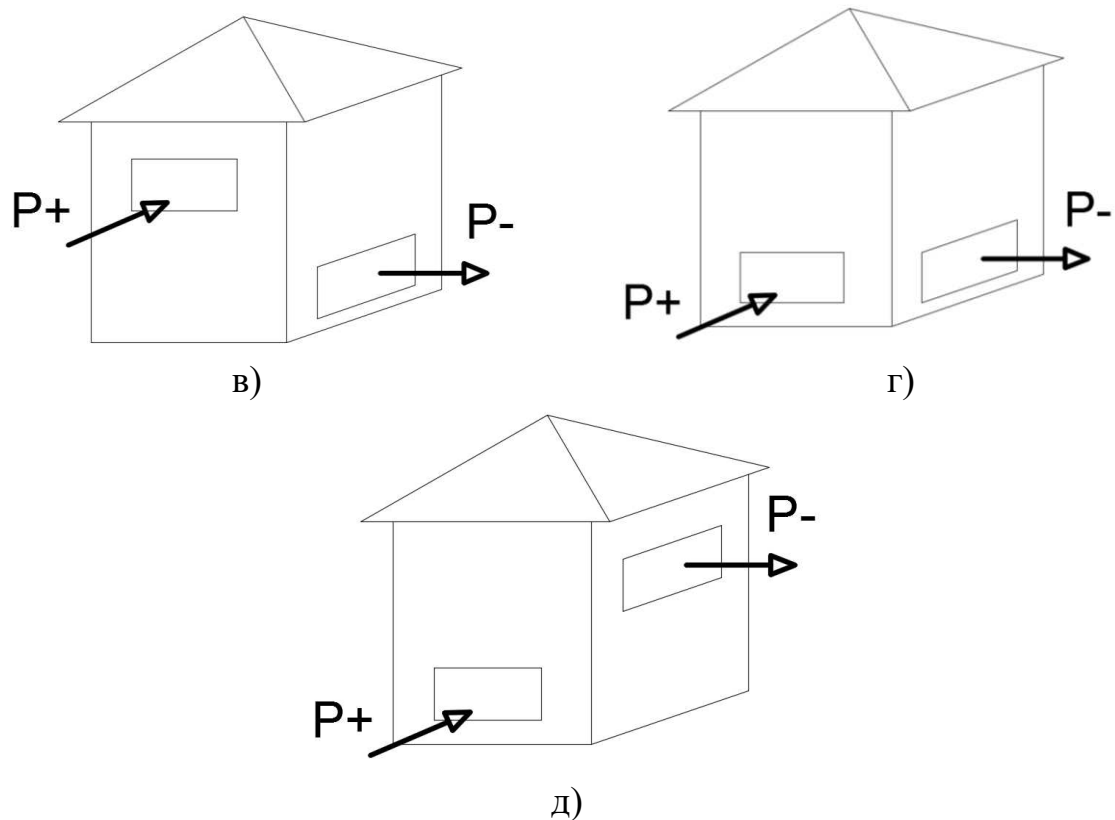


Рис. 1.26. Принципова схема перехресної кутової вентиляції з розташуванням припливного та витяжного отворів: а – по середині; б – в верхній частині будинку; г – припливний отвір вище витяжного; г – в нижній частині будинку; д – припливний отвір нижче витяжного

Порівняно з односторонньою вентиляцією, кутова вентиляція здатна забезпечити більш високу швидкість вентиляції [133], покращену якість повітря в приміщенні та максимальну холодопродуктивність. Це пов'язано з перепадом тиску між різними фасадами, що призводить до більш ефективного видалення забруднень із приміщення. З іншого боку, висока швидкість перехресної вентиляції може призвести до появи місцевих протягів, гучного шуму вітру, різких поривів вітру, переривання діяльності в приміщенні через надмірний потік повітря та проникнення небажаного пилу й зовнішнього шуму [134].

Традиційним пристроєм природної вентиляції з нульовим енергоспоживанням, здатним зменшити споживання енергії будівлею, одночасно покращуючи якість

повітря та тепловий комфорт усередині будівель [135], є вітряна вежа, яку ще називають вітровловлювачем. Вітряна вежа (або вітровловлювач) призначена для «вловлювання» зовнішнього вітру на великій висоті з метою направлення повітря до внутрішніх приміщень будівлі. Приклади різних типів вітровловлювачів розглянуто в пункті 1.2. Уважається, що перші вітровловлювачі були побудовані близько 1200-х років [93]. Традиційні вітровловлювачі все ще використовуються на Близькому Сході, тоді як сучасні версії знаходять своє застосування в країнах Європи [136].

У вітряних вежах ефект плавучості відіграє другорядну роль. Основною ж рушійною силою є різниця тиску, яку створює вітер на конструкції вітровловлювача [137].

Упродовж дня зовнішнє повітря потрапляє в будівлю завдяки надлишковому тиску. Внутрішнє повітря витягується через сторону негативного тиску вітровловлювача (рис. 1.27, а). У нічний час процес вентиляції регулюється різницею щільності повітря, спричиненою коливаннями температури. Зовнішнє більш прохолодне повітря опускається в будівлю завдяки вищій щільності та витісняє тепліше внутрішнє повітря (рис. 1.27, б).

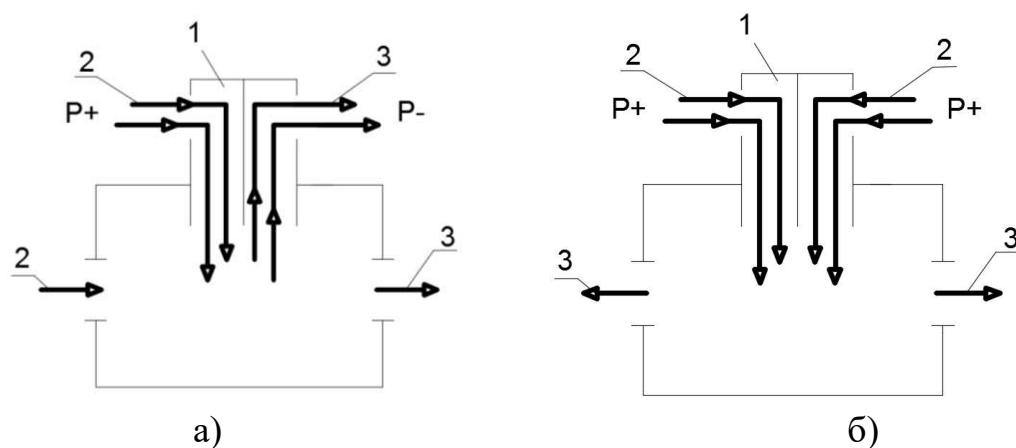


Рис. 1.27. Принципова схема роботи вітровловлювача вдень (а) та вночі (нічне охолодження) (б); 1 – вітровловлювач; 2 – припливне свіже повітря; 3 – витяжне внутрішнє повітря

На швидкість вентиляції впливають геометричні параметри вітровловлювача [138], а саме: висота [139], [140], [141]; форма поперечного перерізу [142], [143]; зовнішня форма [144]; розмір, форма, кількість і розташування вхідних і вихідних отворів [147], [146], [147].

На ефективність вітровловлювача впливають кліматичні (місцева погода, швидкість і напрямок вітру [148], температура та вологість повітря) та зовнішні параметри (наявність і поверховість навколишньої забудови [149], [150], форма даху [151], розташування кількох вітровловлювачів) [152].

Вентиляція у звичайних будинках здійснюється за рахунок неконтрольованого природного спонукання руху повітря, яке проникає в приміщення через спеціальні пази у вікнах і видаляється вентиляційними системами. В енергоощадних будинках, обладнаних спеціальними «теплыми» вікнами та зовнішньою оболонкою, що складається із супер ізольованих зовнішніх стін, даху, підлоги та плит перекриття, для вентиляції використовується керована припливно-витяжна система вентиляції з рекуперацією повітря, яка унеможливорює неконтрольований рух повітря.

Критичний аналіз концепції енергоощадного будівництва, принципів природної вентиляції та відповідних літературних джерел підтверджує, що ефективним рішенням для енергоощадного будівництва, яке дозволяє регулювання витрати припливного повітря та підтримувати комфортний мікроклімат без значних втрат тепла або надмірного охолодження, є природна вентиляція з вітровловлювачем. Використовуючи природну силу вітру для забезпечення припливу свіжого повітря й видалення відпрацьованого повітря з приміщення, вітровловлювач здатен покращити швидкість вентиляції з мінімальними енергозатратами.

1.5. Огляд наявних методик розрахунку пасивних систем підтримання параметрів мікроклімату в приміщеннях

Останніми роками, після короткочасного й деколи надмірного захоплення механічною вентиляцією, знов зростає інтерес до природної вентиляції, яка відіграє життєво важливу роль у якості повітря в приміщенні, тепловому комфорті та споживанні енергії будівлею. Тим паче, клімат території нашої держави сприяє застосуванню природної вентиляції, яка завжди вважалася виправданою для житлових будинків масового будівництва. Увага до природної вентиляції викликана сукупністю чинників: проблематикою енергопостачання, дефіцитом електроенергії й недостатнім повітрообміном, який призводить до підвищення відносної вологості внутрішнього повітря, сприяє створенню хвороботворної мікрофлори у квартирі, появі плісняви, грибків і комах, забруднення повітря шкідливими мікродомішками (продуктами життєдіяльності людського організму, газовиділеннями кухні, санвузлів, побутової хімії, виділеннями запахів і шкідливих речовин сучасними оздоблювальними та меблевими матеріалами, комп'ютерами тощо).

Згідно з [153], одним із етапів упровадження енергоощадних заходів в Україні є зменшення вентиляційної складової теплових навантажень у житлових і комерційних будівлях, яка може становити від 25 до 50% [154], [155].

На відміну від оцінювання енергоефективності будівель, для природної вентиляції не існує загальноприйнятого показника оцінювання. У сучасних дослідженнях використовуються найпоширеніші показники: економія енергоспоживання, кратність повітрообміну, якість повітря в приміщенні, рівень теплового комфорту. Усі ці показники природної вентиляції можна розділити на дві категорії, одні з яких зосереджені на вимогах до природної вентиляції (якість повітря в приміщенні, тепловий комфорт), а інші – на ефектах природної вентиляції (економія енергоспоживання, швидкість повітрообміну) [156].

Кратність повітрообміну є одним із багатьох чинників, який має найбільший вплив на енергетичну характеристику будівлі. Природна складова кратності повітрообміну при однакових теплофізичних властивостях огорожень має різні значення для різних приміщень і залежить від багатьох чинників: швидкості та напрямку вітру, поверховості забудови, опору повітропроникності, температури зовнішнього та внутрішнього повітря [157].

Вирішальне значення має ефективне проектування природної вентиляції в будівлях, оскільки рушійні сили довкілля не постійні та можуть швидко змінюватися за короткий проміжок часу. Ці раптові зміни можуть призвести до надмірної вентиляції, викликавши дискомфорт, втрату тепла, та недостатньою якості внутрішнього повітря [158]. Недостатній повітрообмін у будинку викликає мала інфільтрація для нормативного припливу через установлення вікон зі склопакетів і герметичних дверей квартир з низькою повітропроникністю (а без припливу немає і витяжки) та кондиціонування приміщень, через що температура внутрішнього повітря стає нижче температури зовнішнього повітря. Природна витяжка неможлива у такому разі, та може спостерігатися зворотна тяга. Отже, природна вентиляція залежить від кліматичних умов і важко регулюється. Часто єдиною можливістю регулювання є регулювання розміру витяжного отвору. У безвітряні дні та при однаковій зовнішній і внутрішній температурах рушійна сила відсутня, тому рух повітря не буде відбуватися.

1.5.1. Вентиляція, створена ефектом Стека

Оскільки різниця тисків є рушійною силою руху повітря, то під час розрахунків природної вентиляції, метою яких є визначення достатньої кількості свіжого припливного повітря, підтримання оптимальних параметрів мікроклімату приміщень та енергоефективність, необхідно розраховувати тиск на огорожувальні конструкції. Різниця тиску в будівлі створюється ефектом стека (ефектом плавучості) та тиском вітру.

Загальний тиск можна виразити рівнянням:

$$\Delta P_{\text{tot}} = \Delta P_s + \Delta P_w, \text{ Па}, \quad (1.1)$$

де ΔP_{tot} – загальна різниця тиску, Па;

ΔP_s – різниця тиску від ефекту стека, Па;

ΔP_w – різниця тиску від вітру, Па.

Природна вентиляція виникає, коли різниця тиску, створювана вітром (керована вітром) або ефектом стека, діє на один або більше отворів в огорожувальній частині будівлі. Швидкість природної вентиляції можна розрахувати за формулою [159]:

$$V_{\text{nv}} = \sqrt{(V_{\text{wind}}^2) + (V_{\text{stack}}^2)}, \text{ м/с}. \quad (1.2)$$

Ефект стека (так званий ефект плавучості) створюється завдяки різниці щільності між внутрішнім і зовнішнім повітрям. Тиск повітря зменшується з висотою за формулою:

$$P(h) = P_{\text{ref}} + h \cdot \rho \cdot g, \text{ Па}, \quad (1.3)$$

де P_{ref} – тиск повітря на висоті h , Па.

На рис. 1.28. зображено залежність тиску повітря на висоті h , м [160]. Нахил кривої збільшується при зменшенні густини. Оскільки зі зменшенням температури значення густини зростає, то нахил профілю тиску також буде збільшуватися зі збільшенням температури.

Оскільки рушійною силою повітряного потоку є тиск, це означає, що повинна існувати висота h , на якій зовнішній і внутрішній тиски будуть однаковими. Цей рівень називається рівнем нейтрального тиску (РНТ). Якщо РНТ використовується як точка відліку у формулі (1.3), різницю зовнішнього та внутрішнього тисків можна розрахувати за формулою (1.4) (рис. 1.29). Якщо припустити, що повітря діє як ідеальний газ, існує простий зв'язок між густиною й температурою, і тиск можна записати як функцію температури за формулою:

$$\Delta P_s = \Delta P_e(h) - P_i(h) = h \cdot (\rho_i - \rho_e) \cdot g, \text{ Па}; \quad (1.4)$$

$$\Delta P_s = h \cdot 3456 \cdot \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right), \text{ Па}, \quad (1.5)$$

де $P(h)$ – тиск на висоті h , Па;

P_{ref} – тиск у контрольній точці, Па;

h – висота над контрольною точкою, м;

ρ – щільність, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

ΔP_s – різниця тиску від ефекту стека, Па;

T_e та T_i – температура зовнішнього та внутрішнього повітря, К.

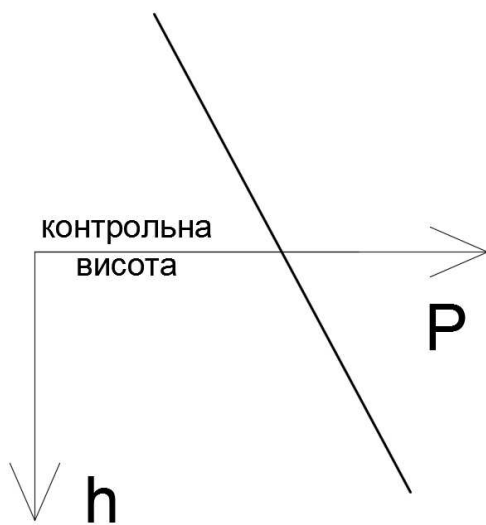


Рис. 1.28. Залежність тиску повітря від висоти h

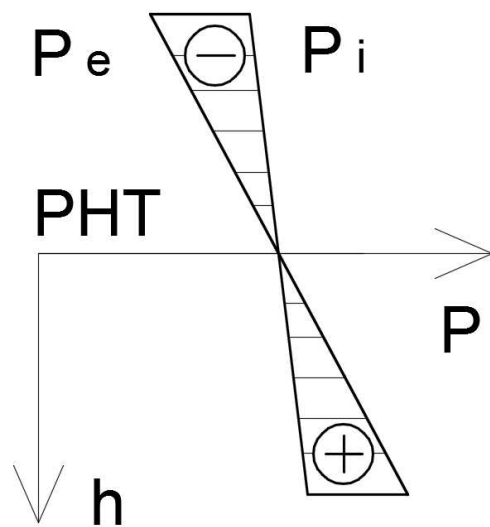


Рис. 1.29. Різниця між внутрішнім і зовнішнім тиском

Для визначення різниці тиску можна використати найпростішу формулу:

$$\Delta P = \rho_0 \cdot g \cdot h \cdot \left(\frac{T_{\text{Int}} - T_{\text{Out}}}{T_{\text{Int}}} \right), \text{ Па}, \quad (1.6)$$

де ΔP – перепад тиску через ефект стека, Па;

ρ_0 – густина зовнішнього повітря, кг/м³;

h – висота між двома отворами, м;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

T_{Int} та T_{Out} – внутрішня та зовнішня температури повітря, К.

Більша різниця температур спричиняє більшу плавучість [158].

Швидкість вентиляції за рахунок ефекту стека визначається за формулою [97]:

$$V_{\text{stack}} = C_D \cdot A_{\text{opening}} \cdot F_{\text{schedule}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H_{\text{NPL}} \cdot \frac{(|T_{\text{Int}} - T_{\text{Out}}|)}{T_{\text{Int}}}}, \text{ м/с}; \quad (1.7)$$

$$C_D = 0.40 + 0.0025 \cdot |T_{\text{Int}} - T_{\text{Out}}|, \quad (1.8)$$

де C_D – коефіцієнт розвантаження отвору, безрозмірний;

A_{opening} – площа отвору, м^2 ;

F_{schedule} – значення графіка вентиляції (0.1);

ΔH_{NPL} – висота від середини нижнього отвору до рівня нейтрального тиску, м.

1.5.2. Вентиляція, створена вітровим тиском

Коли повітря, що рухається, наштовхується на перешкоду у вигляді будинку, окрім сповільнення свого руху, відбувається перетворення енергії руху на тиск. Проходячи повз зовнішні межі будинку, вітер захоплює за собою молекули повітря, створюючи розрідження з підвітряного боку будинку. Величина зовнішнього вітрового тиску залежить від швидкості вітру й форми будинку. Тиск вітру на вентиляційний отвір визначається за формулою [161]:

$$P_w = \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot C_p, \text{ Па}. \quad (1.9)$$

При використанні програмного забезпечення для моделювання тиску вітру використовуються формули:

$$P_w = \frac{\rho \cdot V_{\text{met}}^2}{2} \cdot C_h \cdot C_p(\theta), \text{ Па}; \quad (1.10)$$

$$C_h = \frac{V_H^2}{V_{\text{met}}^2} = A_0^2 \cdot \left(\frac{H}{H_{\text{ref}}}\right)^{2a}; \quad (1.11)$$

$$C_p = \frac{2 \cdot (P - P_0)}{\rho_{\text{пов}} \cdot V^2}, \quad (1.12)$$

де P_w – вітряний перепад тиску, Па;

ρ – густина навколишнього повітря, $\text{м}^3/\text{кг}$;

V – швидкість вітру біля поверхні об'єкта, м/с;

V_H – швидкість вітру у найвищій точці об'єкта, м/с;

V_{met} – швидкість вітру за метеоданими з найближчої метеостанції, м/с;

C_h – коефіцієнт тиску вітру з урахуванням укриття;

$C_p(\Theta)$ – коефіцієнт вітрового тиску для кута вітру;

Θ – кут напрямку вітру, град.;

A_o – коефіцієнт вітрозахисту;

a – показник вітрозахисту;

H – висота будівлі, м;

H_{ref} – висота вимірювального обладнання, м.

Безрозмірний коефіцієнт вітрового тиску, C_p , представляє розподілення вітрового тиску над об'єктом, за допомогою якого можна розрахувати вітровий тиск на огорожувальну конструкцію будівлі в конкретному місці на основі місцевої швидкості вітру (1.9). Загальний вираз коефіцієнта C_p наведено у формулі (1.12). Коефіцієнт тиску, як правило, розраховується на підставі даних, отриманих у результаті експериментальних випробувань, випробувань в аеродинамічній трубі або натурних випробувань на будівлях різної форми й висоти [162].

Швидкість вентиляції розраховується за формулою [97]:

$$V_{\text{wind}} = O_w \cdot A_{\text{opening}} \cdot F_{\text{schedule}} \cdot S_{\text{wind}}, \text{ м/с}, \quad (1.13)$$

де O_w – ефективність відкриття, безрозмірна величина;

A_{opening} – площа отвору, м^2 ;

F_{schedule} – значення графіка вентиляції (0.1);

S_{wind} – швидкість вітру, м/с.

Ефективність відкриття залежить від кута між фактичним напрямком вітру та ефективним кутом входу за формулою:

$$O_w = 0,55 + \frac{|\alpha_{\text{effective}} - \alpha_{\text{wind}}|}{180^\circ} \cdot 0,25, \quad (1.14)$$

де $\alpha_{\text{effective}}$, α_{wind} – кути ефективного входу вітру та навітряного напрямку вітру, град.

Рух повітря, обумовлений тиском вітру, залежить від коефіцієнтів тиску C_p , напрямку вітру та швидкості вітру на висоті отвору. Для вентиляції з окремими вхідними й вихідними отворами однакового розміру й незначним внутрішнім

опором, об'ємну витрату при одночасному впливі вітрового потоку та ефекту плавучості можна розрахувати за формулою [163]:

$$q_v = C_D \cdot A_{\text{eff}} \cdot \sqrt{\frac{C_{p,1} \cdot V_{w,1}^2 - C_{p,2} \cdot V_{w,2}^2}{2} \pm \frac{(T_{\text{Int}} - T_{\text{Out}}) \cdot g \cdot h_s}{T_{\text{Int}}}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1.15)$$

де C_D – коефіцієнт розвантаження отвору;

A_{eff} – ефективна площа поперечного перерізу отвору при однакових розмірах вхідного та вихідного отворів, м^2 ;

C_p – коефіцієнти вітрового тиску для вхідного та вихідного отворів для вхідного й вихідного отворів;

V_w – опорна швидкість вітру на місцевій висоті одного отвору, $(\text{м}/\text{с})$;

T – температура внутрішнього (T_{in}) та зовнішнього повітря (T_{out}), К ;

g – прискорення сили тяжіння, $\text{м}/\text{с}^2$;

h_s – різниця висот між середніми точками отворів, м .

Витрата повітря розраховується за формулою:

$$Q = C_D \cdot A \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}\right)^{0.5}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1.16)$$

де A – площа потоку, м^2 ;

ΔP – різниця тиску в отворі, Па ;

ρ – густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Площа живого перерізу повітропроводу визначається за формулою:

$$F = \frac{L}{3600 \cdot V}, \text{ м}^2, \quad (1.17)$$

де L – розрахункова витрата повітря, $\text{м}^3/\text{год}$;

V – швидкість повітря в повітропроводі, $\text{м}/\text{с}$ (приймається 0,5... 1,0 $\text{м}/\text{с}$).

Розрахунок природної вентиляції та вибір перерізу каналів проводять відповідно до чинних нормативів для температури зовнішнього повітря 5 °С і температури всередині приміщення 20 °С. Саме за цих температур повітрообмін відповідає санітарним нормам. За температури зовнішнього повітря вище 5 °С відбувається зниження ефективності природної вентиляції.

Принцип дії природної вентиляції в її класичному виконанні ґрунтується на різниці щільності повітря зовні та всередині приміщення. При аеродинамічному

розрахунку природної витяжної каналної вентиляції природний тиск знаходиться за формулою:

$$\Delta P = g \cdot h \cdot (\rho_z - \rho_v), \text{ Па}, \quad (1.18)$$

де h – різниця відстаней по вертикалі від центру витяжних отворів у приміщенні до верху витяжної шахти, м;

ρ_z та ρ_v – густина зовнішнього та внутрішнього повітря, кг/м^3 :

$$\rho_z = \frac{353}{273+t_z}; \quad \rho_v = \frac{353}{273+t_v}, \quad (1.19)$$

де t_z та t_v – температура зовнішнього та внутрішнього повітря, $^{\circ}\text{C}$.

Протягом останніх десятиліть науковці широко досліджували характеристики повітряного потоку, параметри впливу, ефективні типи природної вентиляції від базового механізму вентиляції до практичних стратегій проєктування в житлових будинках.

Подальші розрахунки природної вентиляції стосуються визначення кута відчинення вікна, висоти вікон і можуть бути поділені на:

- розрахунки односторонньої природної вентиляції, представлені в роботах [96], [121], [129], [164–166];
- розрахунки перехресної природної вентиляції, які наведені в роботах [105], [116], [167], [168].

Наведені розрахунки природної вентиляції не застосовуються в проєктуванні та будівництві енергоощадних будинків через їх неактуальність, оскільки розглянуті принципи не відповідають концепції енергоощадного будівництва. Тому в цьому дослідженні їх не було детально розглянуто.

1.6. Висновки до розділу 1. Постановка завдань досліджень

Дослідження сучасних енергоефективних будівельних технологій і систем підтримання параметрів мікроклімату дало змогу оцінити загальні тенденції розвитку вентиляційних рішень, визначити їхні переваги та виявити недоліки в наявних методах забезпечення якісного повітрообміну. Аналіз показав, що, попри

значний прогрес у сфері енергоощадних технологій, деякі аспекти природної вентиляції залишаються недостатньо вивченими або потребують оптимізації для підвищення ефективності повітрообміну та зниження енергетичних витрат. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення пасивних вентиляційних систем, підвищення їх адаптивності до кліматичних умов та інтеграцію з іншими енергоефективними рішеннями.

Аналіз сучасних підходів до підтримання параметрів мікроклімату в енергоефективних будівлях дозволив визначити ключові особливості, тенденції розвитку та проблемні аспекти наявних систем вентиляції. Проведене дослідження охопило оцінювання категорій будівель за рівнем енергоспоживання, вивчення ефективності технологій регулювання мікроклімату, а також огляд схемних рішень вентиляційних систем.

Зіставлення різних методів забезпечення комфортного повітрообміну показало, що традиційні механічні вентиляційні системи, хоча й забезпечують стабільні параметри мікроклімату, характеризуються високими енергетичними витратами. Водночас пасивні вентиляційні рішення, зокрема системи з використанням природних повітряних потоків, мають значний потенціал для зниження енерговитрат без втрати ефективності.

Огляд сучасних методик розрахунку пасивних вентиляційних систем виявив потребу в уточненні наявних підходів до проєктування, зокрема в частині гідродинамічного аналізу повітряного потоку та оцінювання впливу зовнішніх чинників.

На основі проведеного аналізу сформульовано основні висновки щодо ефективності та перспектив розвитку пасивних систем підтримання параметрів мікроклімату:

1. Аналіз сучасних тенденцій будівельної галузі свідчить про необхідність мінімізації енергоспоживання шляхом упровадження енергоефективних технологій. Зростання енерговитрат і посилення екологічних вимог спонукають до розроблення та впровадження будівельних рішень, що забезпечують високий

рівень комфорту з мінімальними втратами енергії. Особливого значення набувають методи оптимізації теплоізоляції, використання альтернативних джерел енергії та вдосконалення вентиляційних систем.

2. Оцінювання нормативної бази показало, що в Україні активно впроваджуються міжнародні стандарти щодо енергоефективності будівель. Чинні державні будівельні норми (ДБН) та державні стандарти України (ДСТУ) поступово гармонізуються з європейськими нормами, що дозволяє підвищувати якість житлового фонду та сприяє впровадженню новітніх енергоощадних технологій. Разом із цим, необхідним залишається подальше вдосконалення нормативної бази для стимулювання застосування пасивних вентиляційних систем.

3. Будівлі поділяються на традиційні, енергоефективні, пасивні, будівлі з нульовим споживанням енергії та будівлі класу "Енергія+". Основна різниця між цими категоріями полягає в рівні тепловтрат, застосуванні пасивних і активних методів енергозбереження та використанні відновлювальних джерел енергії. Пасивні будівлі та будівлі з нульовим або позитивним енергобалансом є найбільш перспективними в контексті глобальних тенденцій сталого розвитку.

4. Забезпечення комфортного мікроклімату в енергоощадних будівлях передбачає застосування як активних (механічні вентиляційні установки з рекуперацією тепла), так і пасивних систем (природна вентиляція, теплові акумулятори, сонячні колектори). Виявлено, що найбільш ефективними є комбіновані рішення, які поєднують механічні та природні процеси регулювання повітрообміну.

5. Економічний аналіз доводить, що початкові витрати на енергоефективні заходи можуть бути вищими порівняно з традиційними технологіями, проте вони окупаються за рахунок зниження експлуатаційних витрат. Окупність таких інвестицій варіюється залежно від типу будівлі, кліматичних умов та рівня інтеграції відновлюваних джерел енергії, у середньому становлячи від 10 до 15 років.

6. Традиційні механічні системи вентиляції є ефективними, але водночас енергоємними. Використання пасивних рішень, зокрема вітровловлювачів, дозволяє значно знизити витрати на вентиляцію та зробити будівлі менш залежними від електроенергії. Вітровловлювачі сприяють ефективному природному повітрообміну, мінімізують теплові втрати та забезпечують стабільний приплив свіжого повітря без застосування механічних пристроїв.

7. Дослідження наявних вентиляційних рішень вказує на необхідність оптимізації роботи припливно-витяжних систем з урахуванням природних факторів. Використання вітровловлювачів у складі вентиляційних систем дозволяє регулювати повітрообмін відповідно до кліматичних умов, створюючи комфортний мікроклімат без додаткового енергоспоживання.

На підставі проведеного аналізу визначено ключові завдання подальших досліджень:

1. Визначити підходи до інженерного розрахунку систем природної вентиляції з використанням вітровловлювачів, розробити алгоритм оцінювання їхньої ефективності в різних кліматичних умовах.

2. Дослідити взаємозв'язок між геометричними характеристиками вітровловлювача, швидкістю та напрямком набігаючого потоку повітря для встановлення оптимальних параметрів конструкції.

3. Оцінити ефективність традиційних механічних систем вентиляції порівняно з пасивними рішеннями, визначити їхню доцільність залежно від типу будівлі та умов експлуатації.

4. Розробити схемні рішення для включення природної вентиляції до загальної системи енергозбереження будівлі, проаналізувати вплив таких рішень на мікроклімат приміщень.

5. Провести комп'ютерне моделювання та лабораторні експерименти для аналізу гідродинамічних характеристик вітровловлювача, визначити ефективність при різних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАСИВНИХ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ

2.1. Фізична модель вітровловлювача

Для підвищення ефективності природного повітрообміну до складу пасивної системи вентиляції впроваджують додатковий елемент – вітровловлювач, який є одним з екологічно чистих і економічно вигідних рішень у питанні підтримки комфортного мікроклімату в будівлі. Вітровловлювач здатен знизити залежність від електроенергії при забезпеченні необхідної вентиляції, використовуючи лише природні сили вітру та теплової плавучості (див. пункт 1.2, 1.4).

На основі традиційного 8-стороннього вітровловлювача було запропоновано прототип вертикального вітровловлювача (рис. 2.1). Конструкція прототипу складається з рівновіддалених від центральної осі граней 2, з'єднаних між собою, що утворюють корпус вітровловлювача [77]. Кожна з граней 2 має форму паралелограма, вони мають висоту та ширину, які визначаються умовами розміщення в конкретній системі вентиляції. Грані мають вигнуті напрямні ребра, що виступають усередину корпусу вітровловлювача з місць приєднання прилеглих граней 2, і з'єднуються з вигнутими напрямними ребрами інших граней у центрі корпусу вітровловлювача, утворюючи пучок напрямних вигнутих ребер. У верхній частині корпусу вітровловлювача для запобігання витоку припливного повітря встановлено глуху кришку 1, а в нижній частині корпус вітровловлювача приєднано до конфузора 5, який приєднується до вентиляційного каналу 6. Поверхня кожної грані 2 має отвір 4, який має форму паралелограма. З внутрішньої сторони кожної грані 3 встановлено жалюзі (заслінки) 3, які кріпляться вздовж однієї довгої сторони грані 2. Жалюзі (заслінки) 3 є рухомими, мають невелику вагу та самостійно керують потоком повітря відкриваючись та закриваючись, і використовують при цьому різницю тиску навколо отворів 4 граней 2, а в закритому положенні перекриваючи всю площу отворів 4 граней 2.

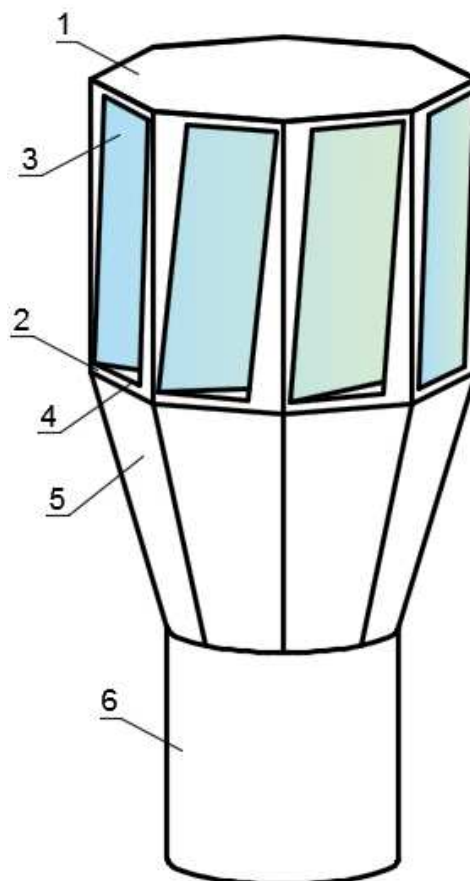


Рис. 2.1. Вітровловлювач: 1 – глуха кришка; 2 – грані; 3 – жалюзі (заслінки); 4 – отвір у грані; 5 – конфузор; 6 – вентиляційний канал

Коли вітер дме з навітряного боку, утворений позитивний тиск відкриває жалюзі (заслінки) 3, які працюють за принципом пасивного зворотного клапана, дозволяючи повітря потрапити до корпусу вітровловлювача крізь отвір 4 грані 2. У той же час негативний тиск на іншому боці вітровловлювача змушує жалюзі (заслінки) 3 прикріпитися до грані вітровловлювача 2, перекриваючи отвір 4 і запобігаючи зворотному потоку повітря (рис. 2.2). Повітря, яке потрапляє до корпусу вітровловлювача, зіштовхується з кришкою 1 та рухається вздовж пучка напрямних вигнутих ребер 2, які надають повітряному потоку вихровий рух і підвищену кінетичну енергію, прямує вниз по спіралі, набираючи швидкість від відцентрового прискорення, і через конфузор 5 потрапляє до вентиляційного каналу 6. Використання жалюзі (заслінок) 3 дозволяє повітря завжди надходити

до вентиляційного каналу 6 вітровловлювача через отвори 4 граней 2, які орієнтовані найближче до набігаючого повітряного потоку, забезпечуючи постійний ефективний забір чистого повітря незалежно від змін напрямку та швидкості вітру. Динамічний процес відкривання та закривання закрилкових плавників з різних боків працює подібно до вітрового черпака [169].

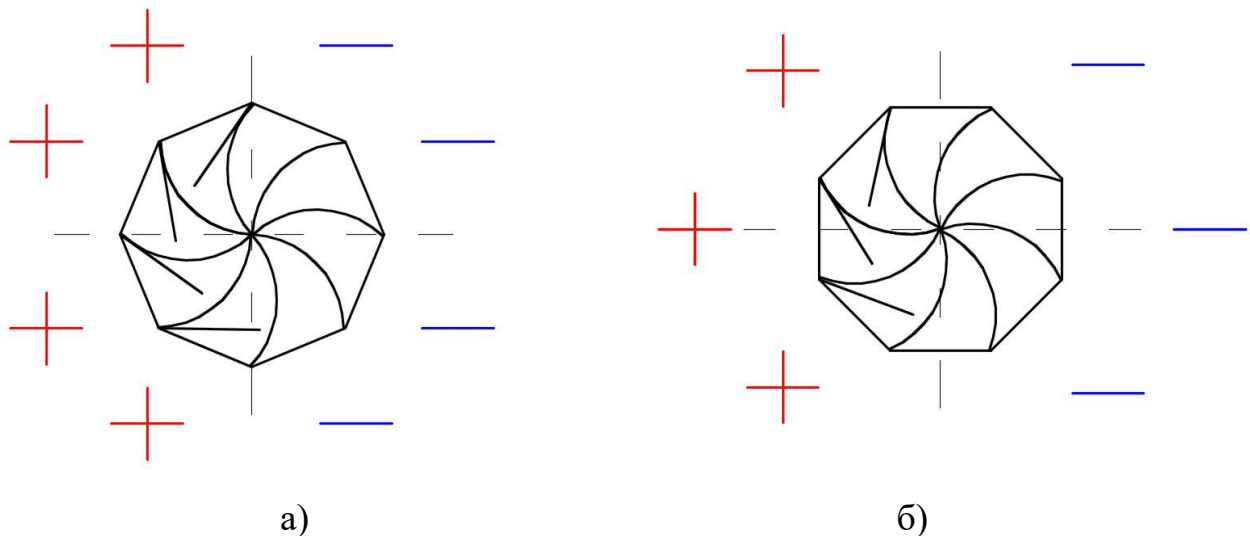


Рис. 2.2. Розташування жалюзі (заслінок) вітровловлювача з навітряного боку залежно від кута набігаючого потоку повітря α : а – при $\alpha = 0$ градусів; б – при $\alpha = 22,5$ градуса

Прототип вітровловлювача було розроблено з метою можливості інтегрування в систему вентиляції старих будинків, будинків після термомодернізації та в нові будинки різних типів під час проектування. Особливість конструкції – гнучкість та універсальність монтажу, що дозволяє розмістити вітровловлювач на різних елементах будівлі (на даху, фасадах або інших зовнішніх конструкціях) для максимально ефективного вловлювання повітряних потоків.

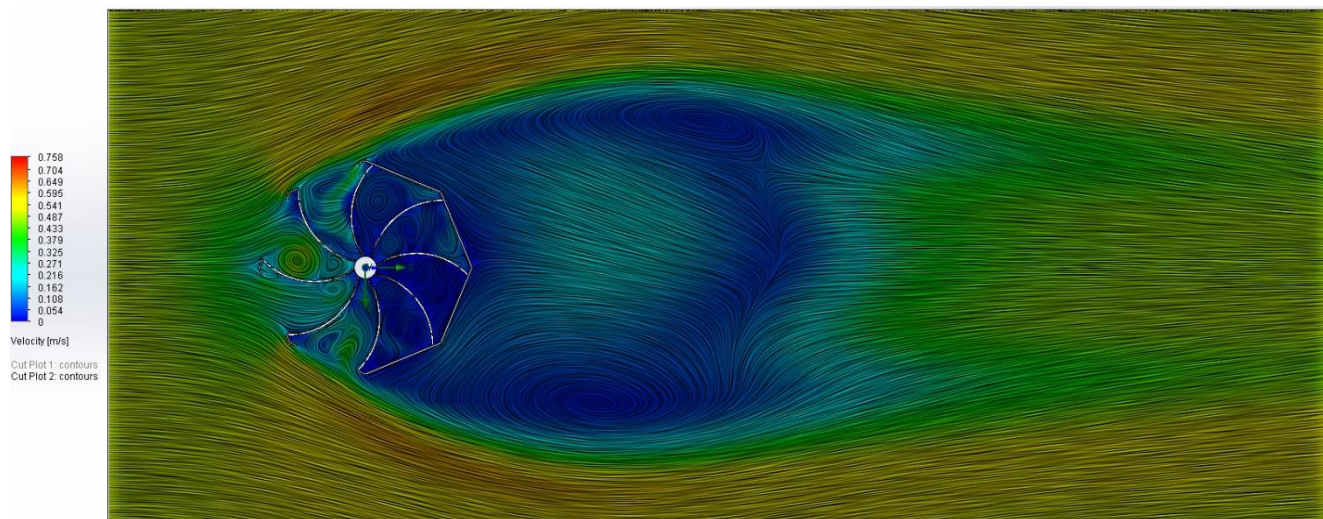
Восьмигранна конструкція вітровловлювача дозволяє зменшити вплив змінного напрямку повітряного потоку на витрату вловленого вітровловлювачем

повітря, забезпечуючи стабільне вловлювання повітря, що робить вітровловлювач універсальним елементом у системі вентиляції.

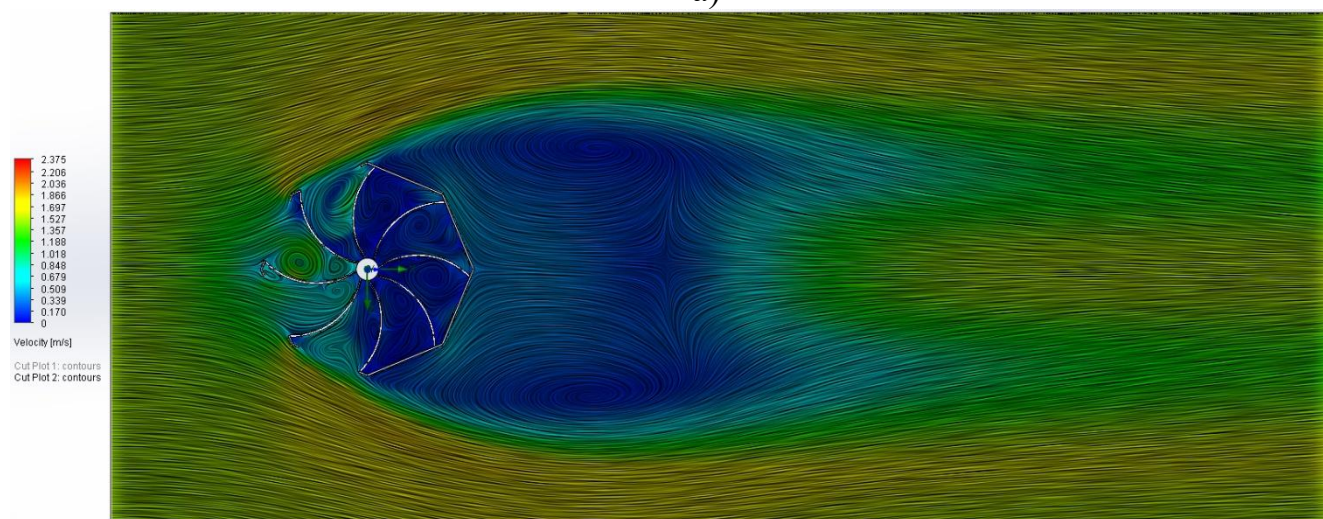
Завдяки своїм конструктивним особливостям вітровловлювач можна більш ефективно інтегрувати в наявні системи природної та механічної вентиляції, а також адаптувати до специфічних умов експлуатації, що, у підсумку, сприятиме підвищенню енергоефективності будівель і зменшенню енерговитрат на вентиляцію.

2.2. Визначення гідродинамічних характеристик вітровловлювача

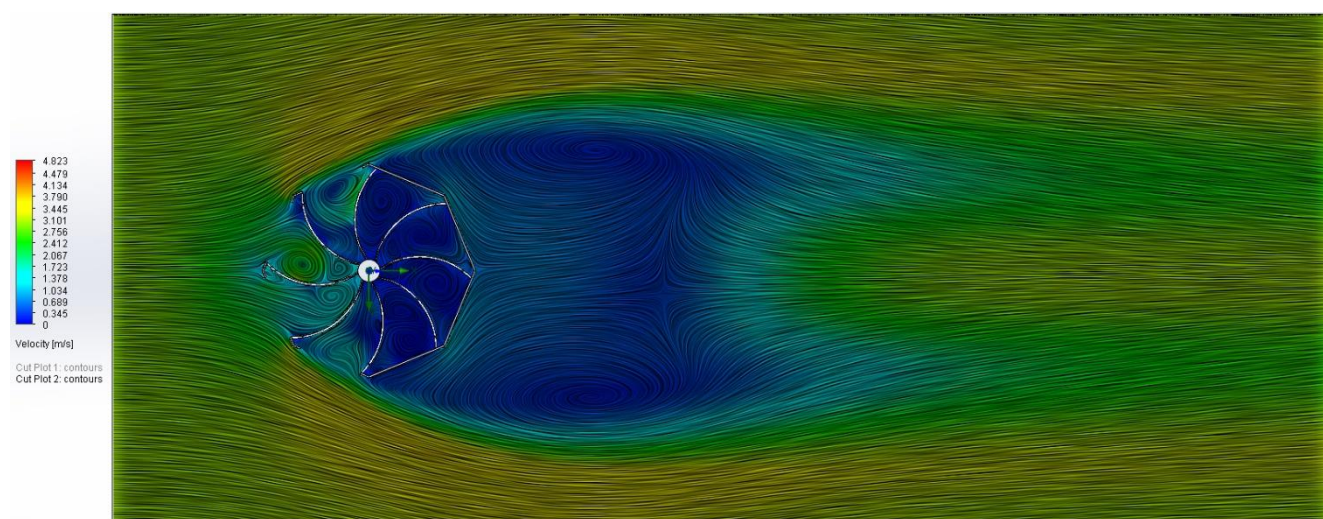
Моделювання змін поведінки повітряного потоку залежно від швидкості набігання повітря та його взаємодії з конструкцією вітровловлювача було виконано за допомогою ліцензійного програмного забезпечення Solidworks Flow Simulation. Як можна побачити на рисунках (рис. 2.3–2.5), з навітряного боку вітровловлювача відбувається зниження швидкості повітряного потоку внаслідок його зіткнення з корпусом вітровловлювача. Це створює зону підвищеного (позитивного) тиску. Частина повітряного потоку з підвищеним (позитивним) тиском потрапляє всередину вітровловлювача, відкриваючи заслінку (жалюзі). Повітря, яке потрапляє до корпусу вітровловлювача, рухається вздовж пучка напрямних вигнутих ребер, які надають повітряному потоку вихровий рух і підвищену кінетичну енергію, прямує вниз по спіралі, набираючи швидкість від відцентрового прискорення, і через конфузور потрапляє до вентиляційного каналу (рис. 2.5). Повітря, яке не потрапило до вітровловлювача, перетворює кінетичну енергію потоку на енергію тиску та з підвищеною швидкістю відривається від поверхні вітровловлювача, огинаючи його та продовжуючи рух у напрямку, який визначається аеродинамічними особливостями конструкції вітровловлювача.



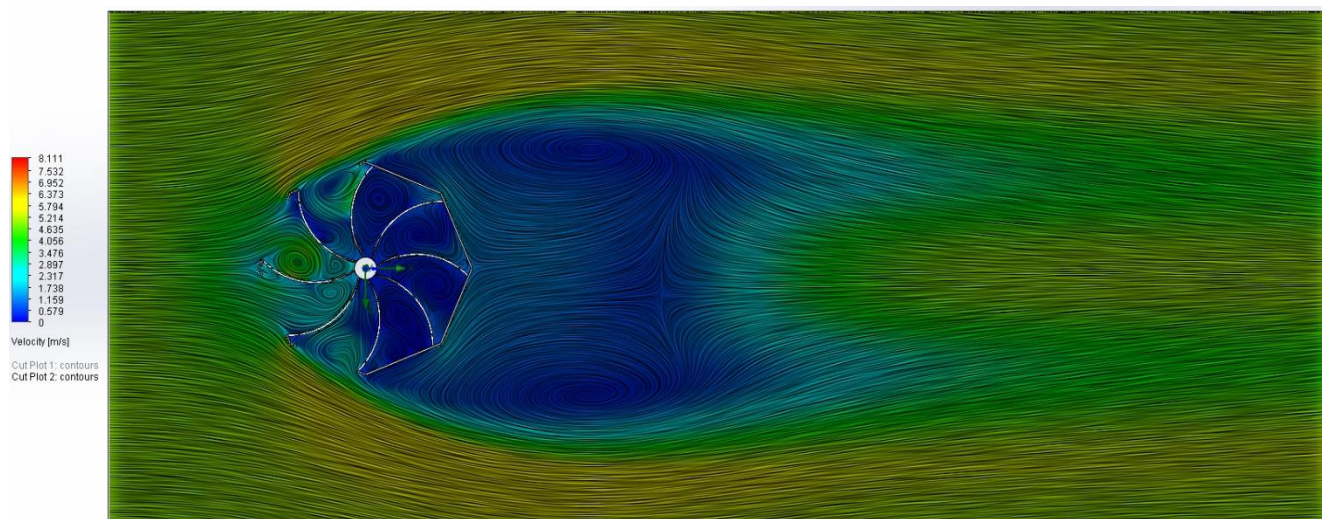
a)



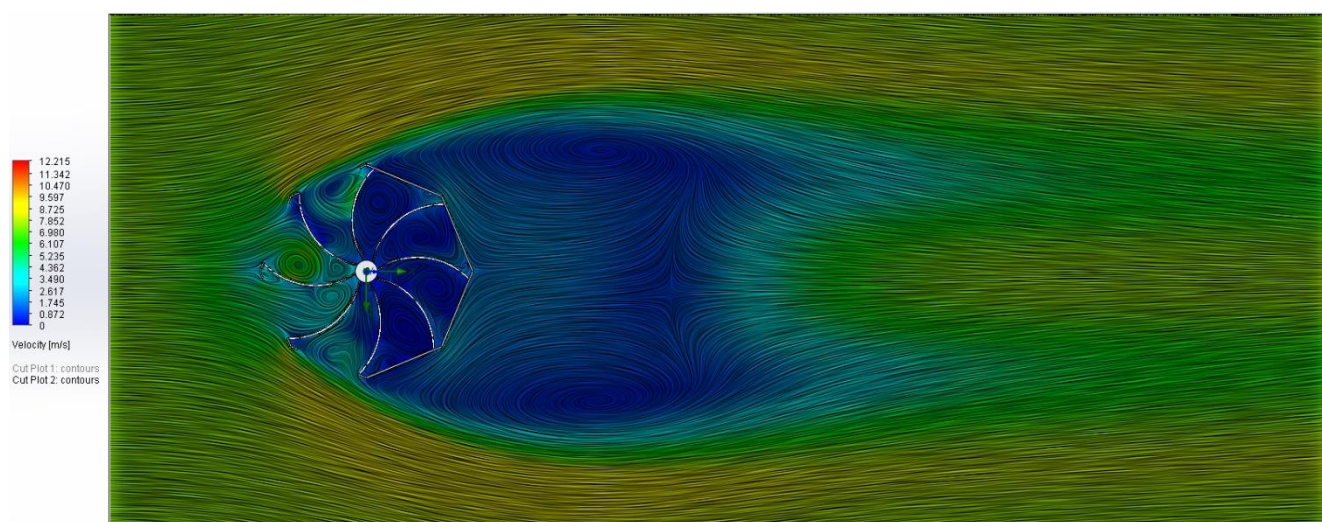
b)



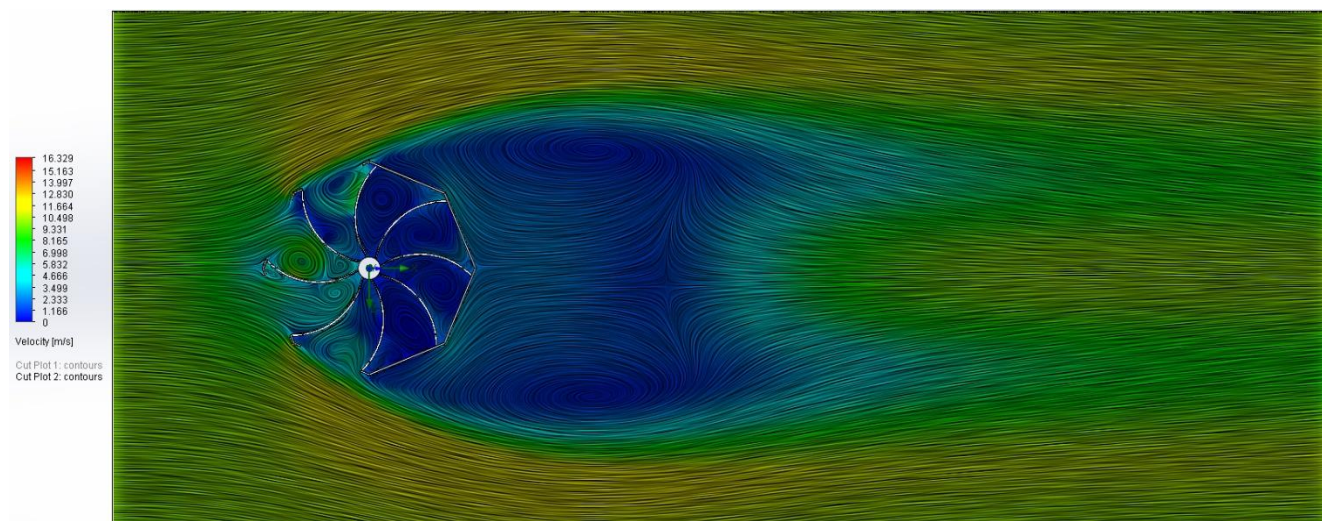
B)



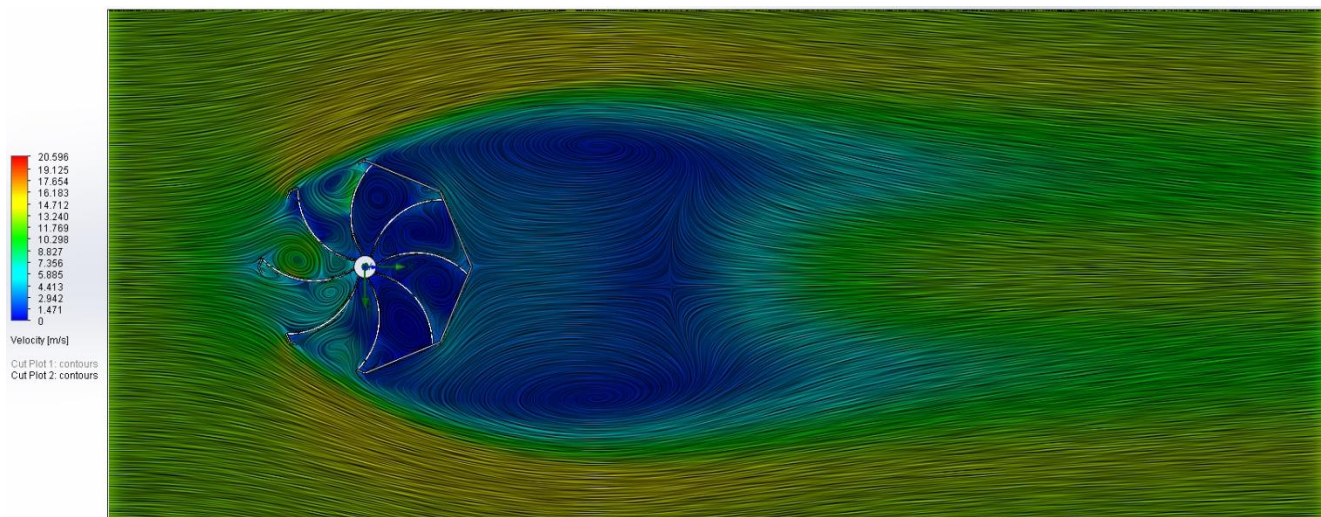
Г)



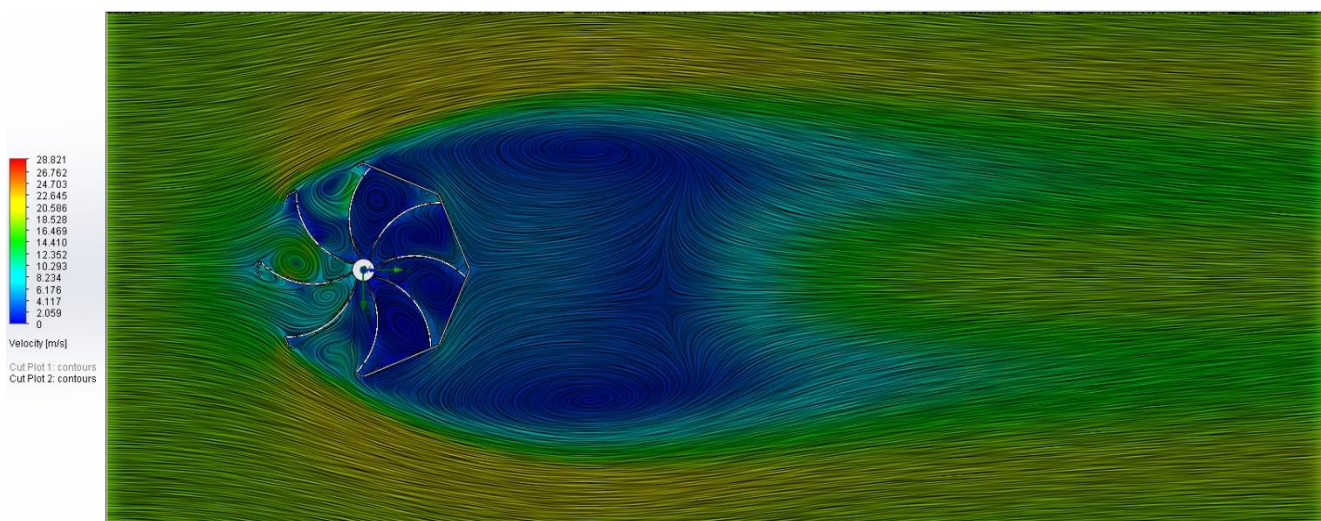
Д)



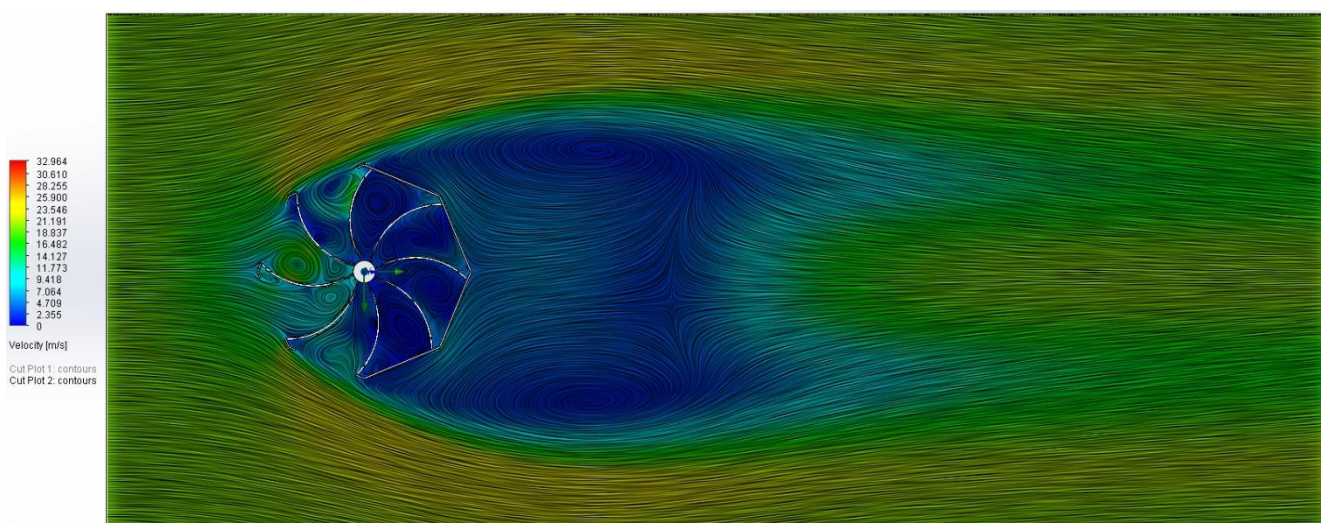
Ж)



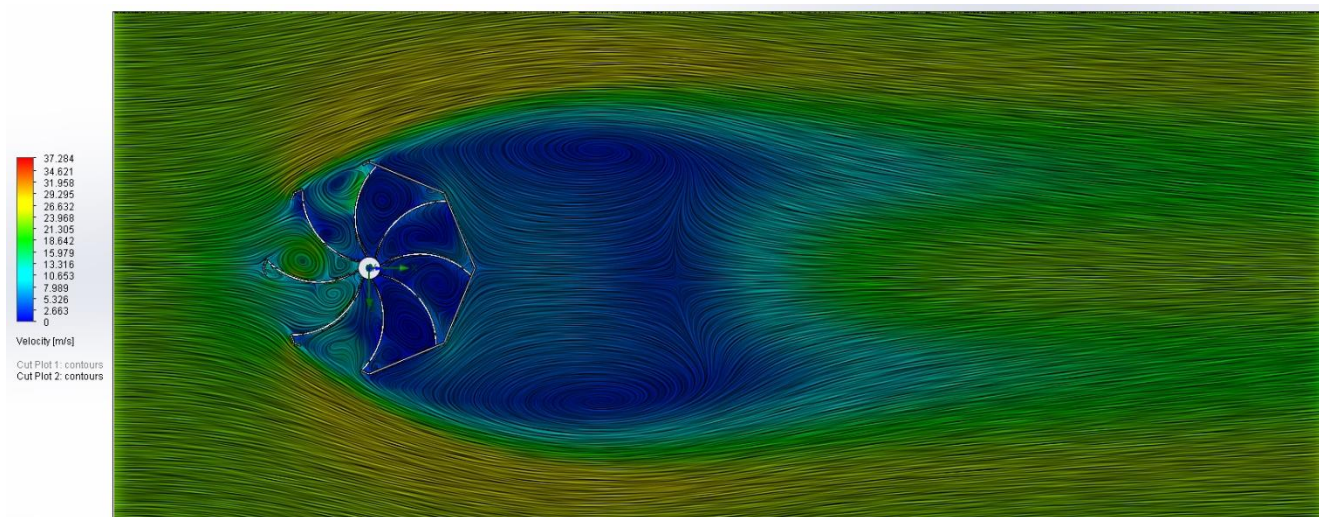
3)



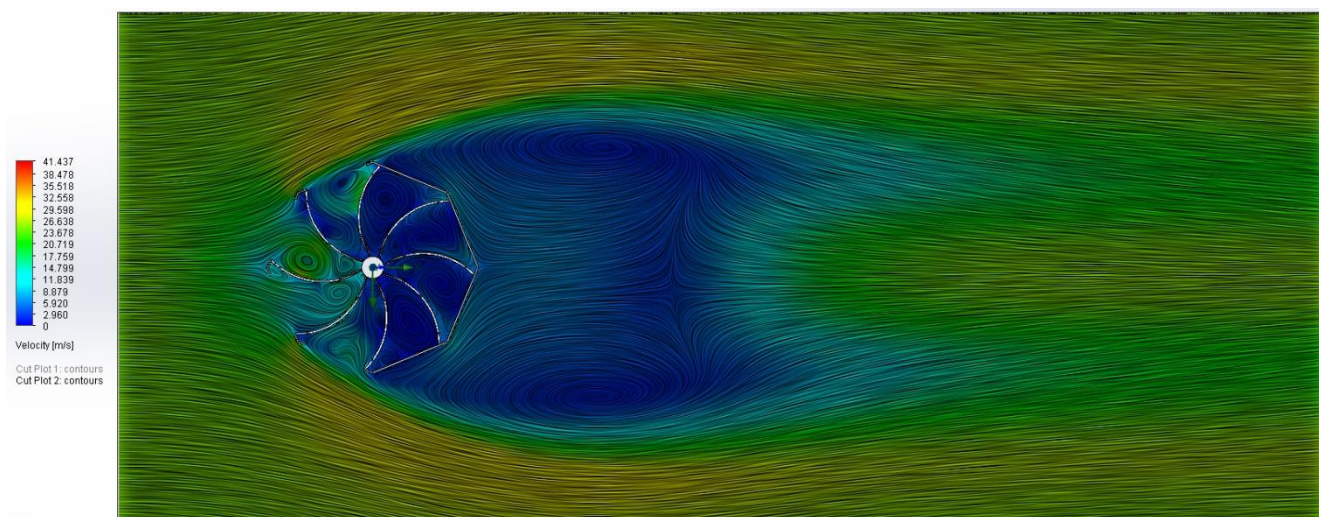
к)



л)

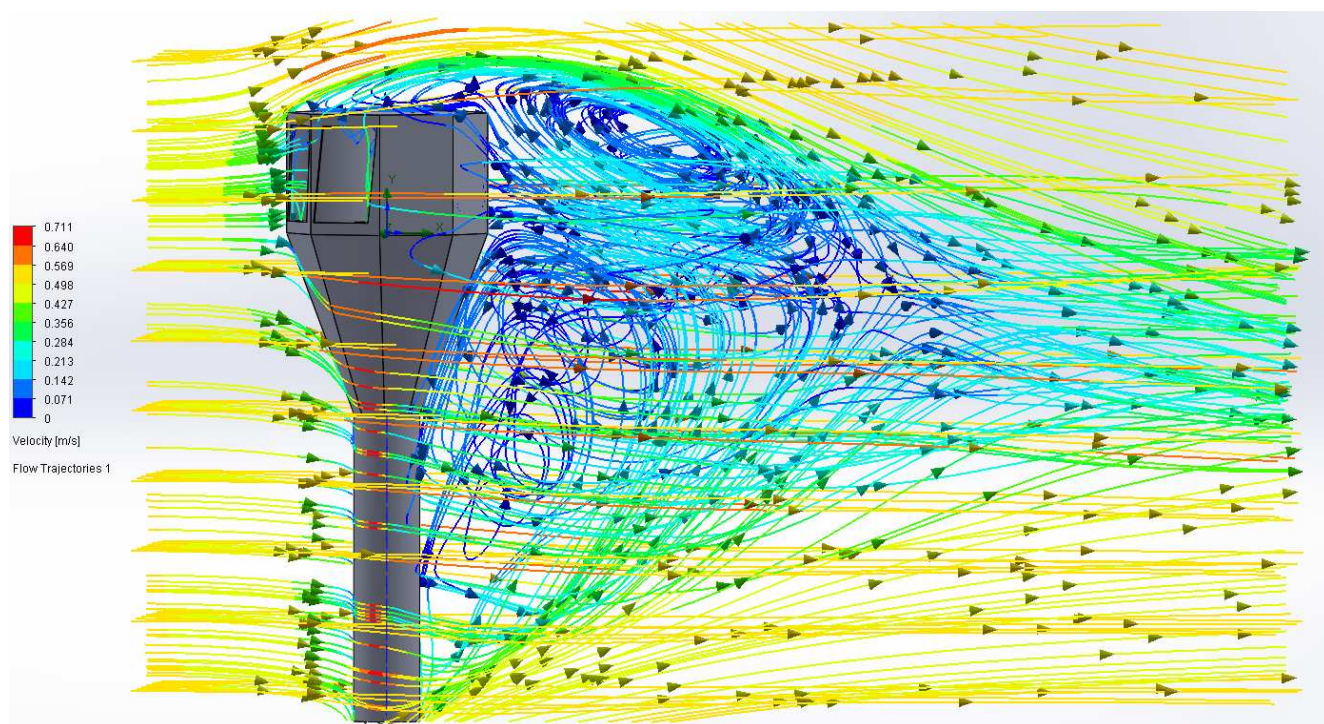


м)

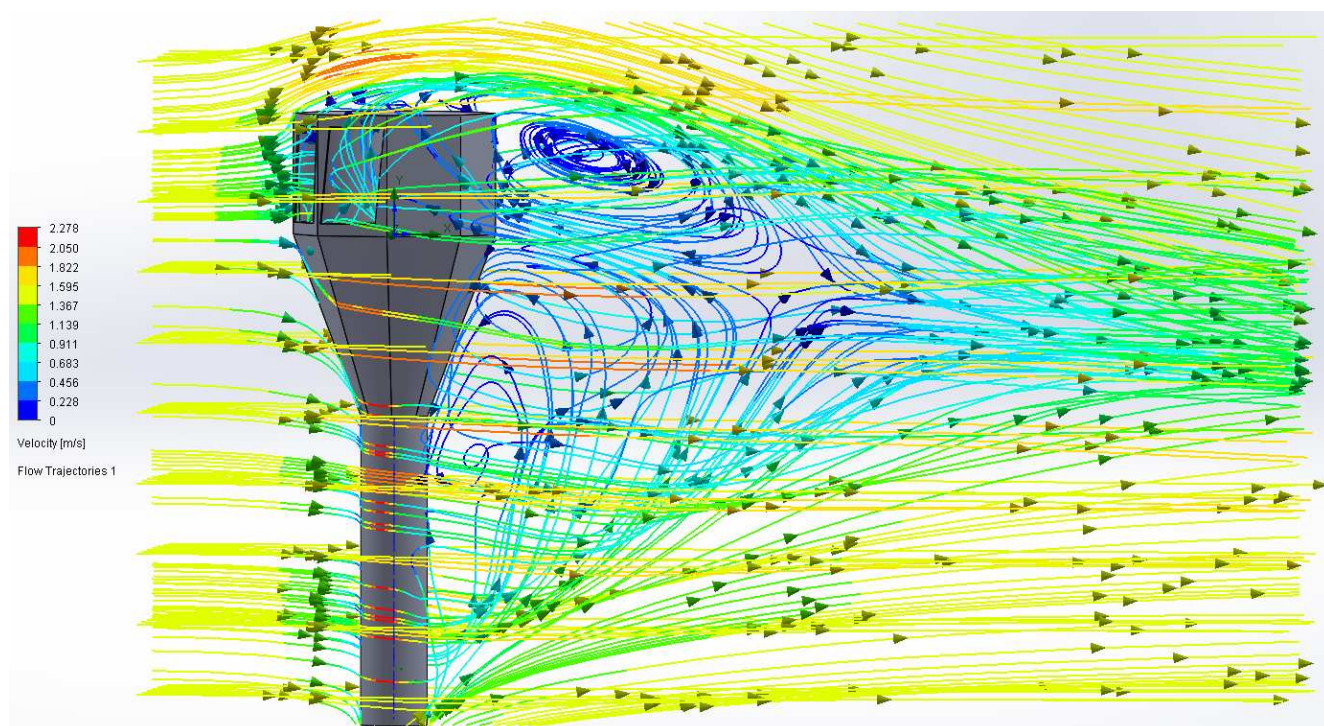


н)

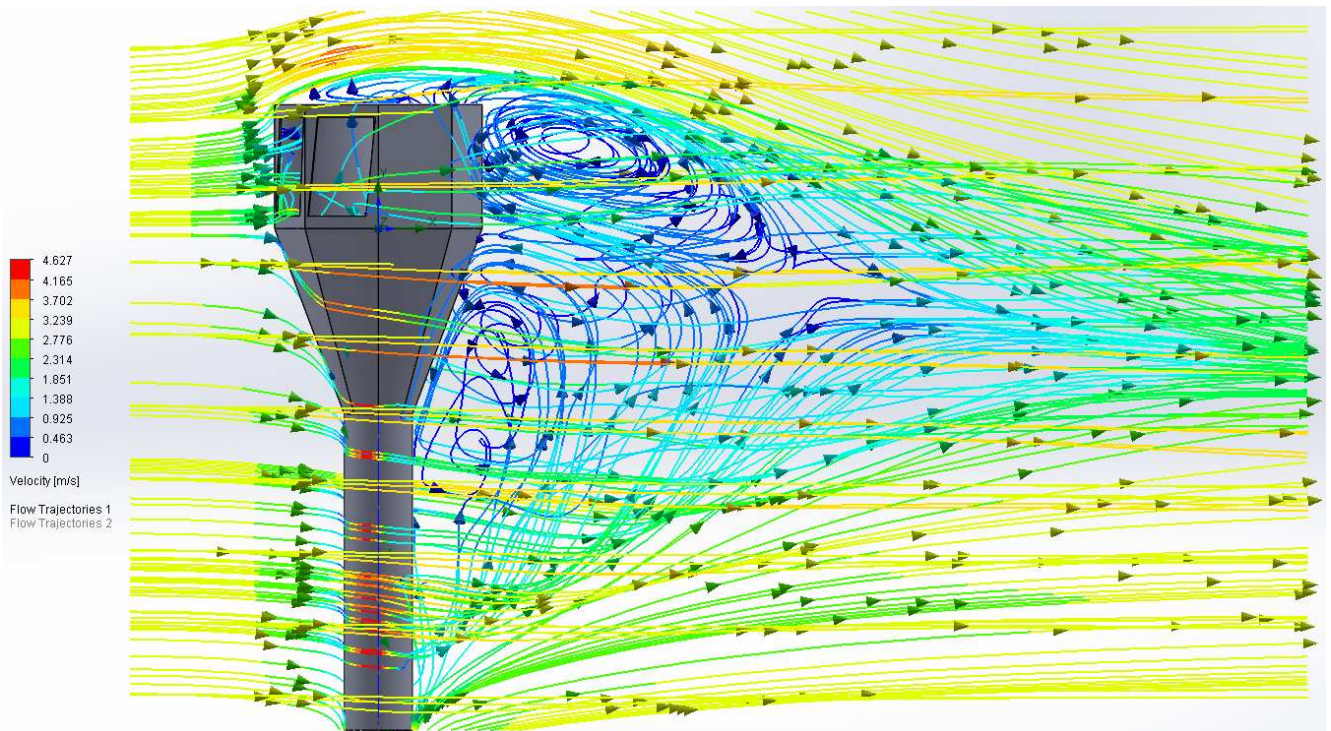
Рис. 2.3. Моделювання процесу обтікання повітряним потоком вітровловлювача в горизонтальній площині при швидкостях: а – 0,5 м/с; б – 1,5 м/с; в – 3 м/с; г – 5 м/с; д – 7,5 м/с; ж – 10 м/с; з – 12,5 м/с; к – 17,5 м/с; л – 20 м/с; м – 22,5 м/с; н – 25 м/с



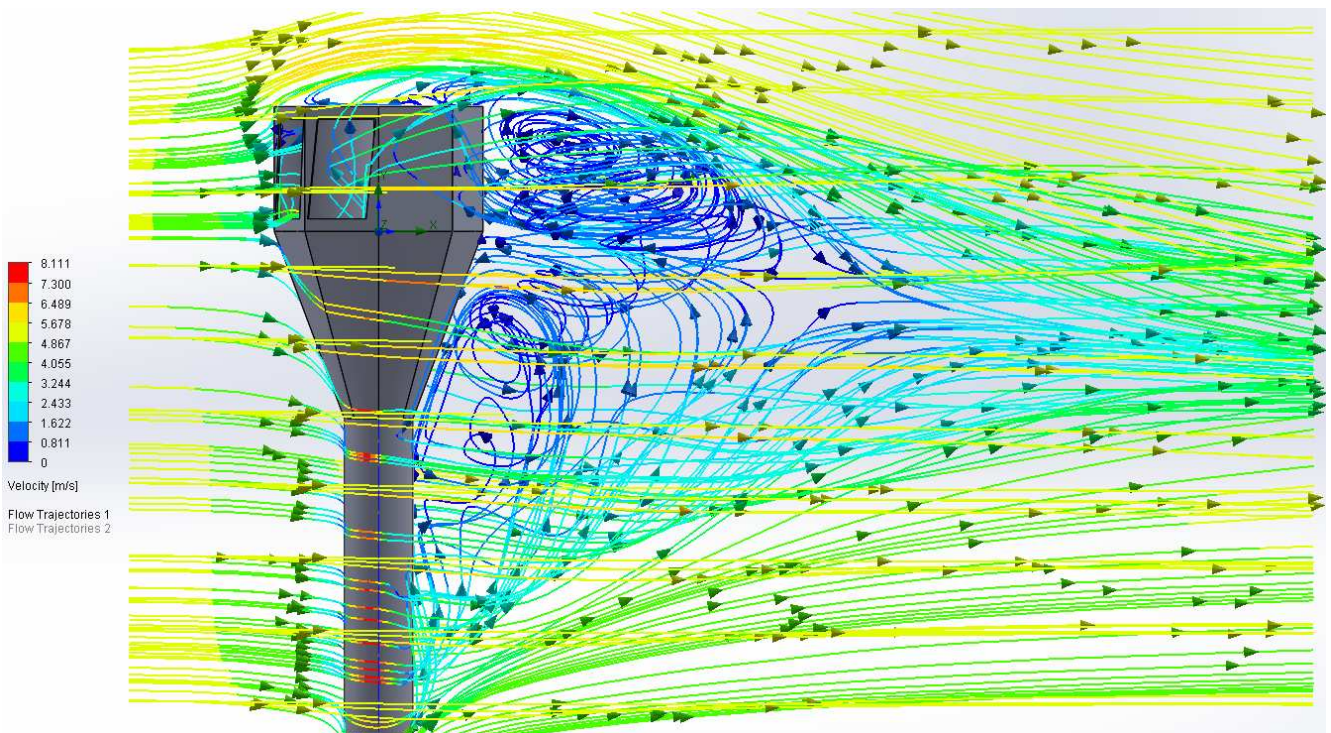
a)



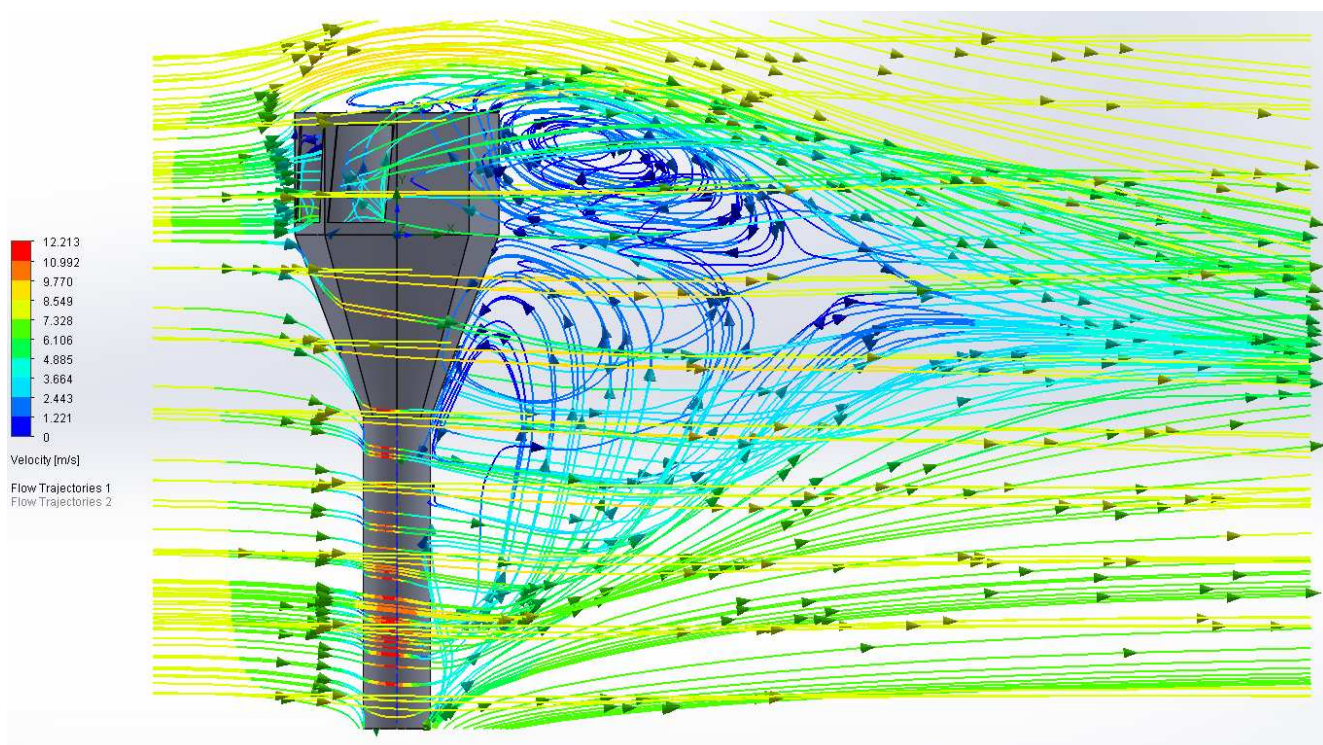
b)



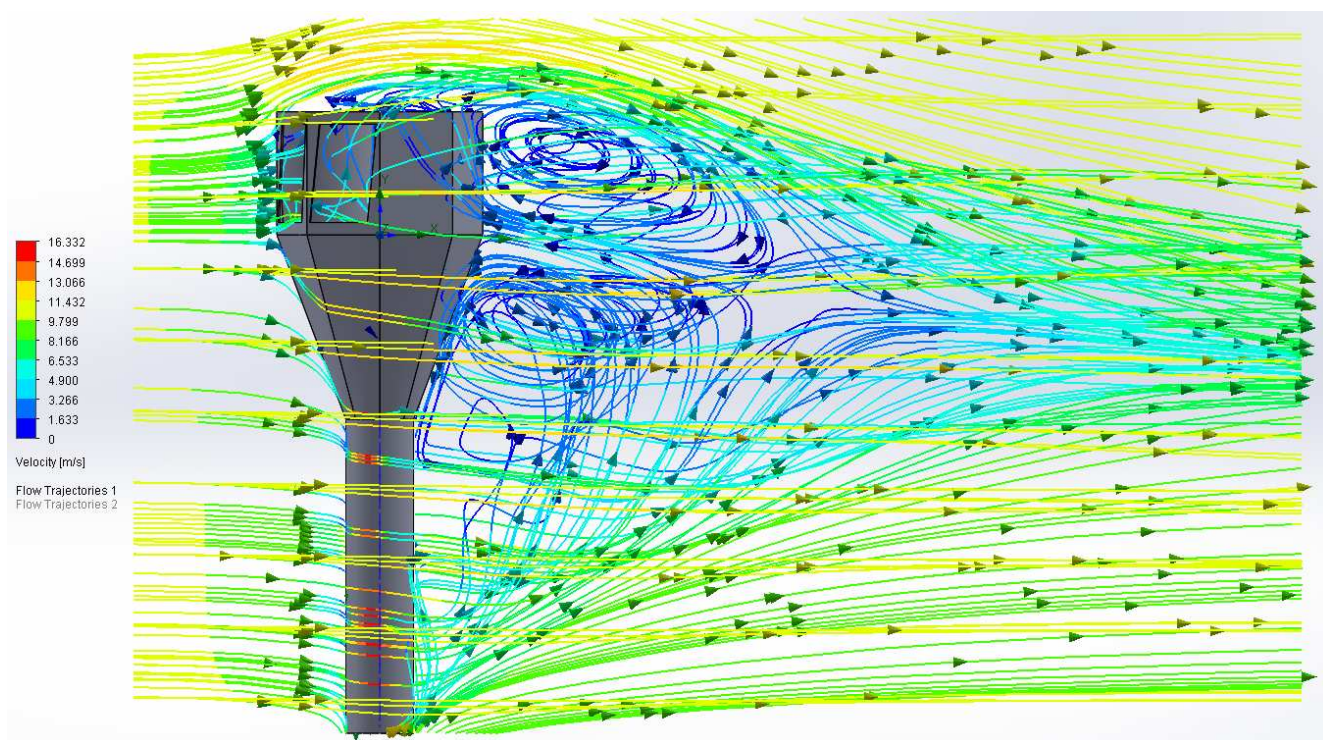
B)



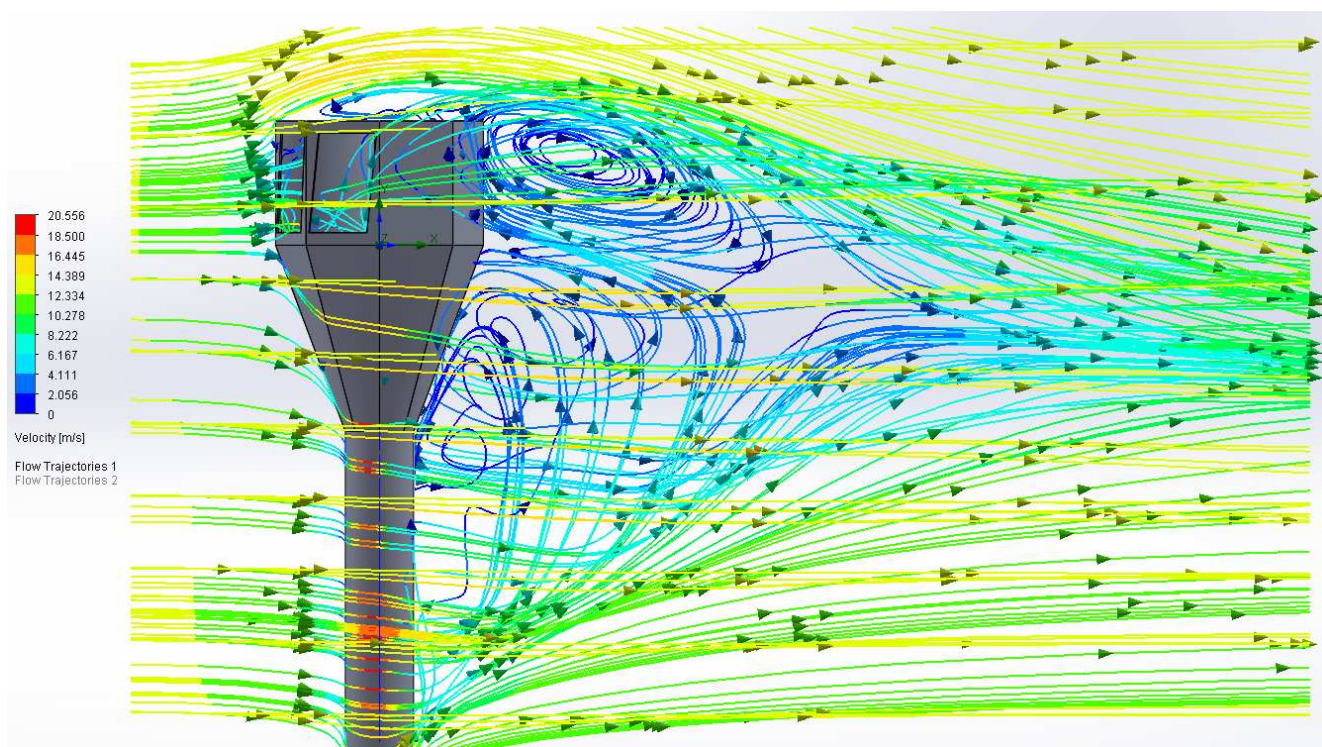
Γ)



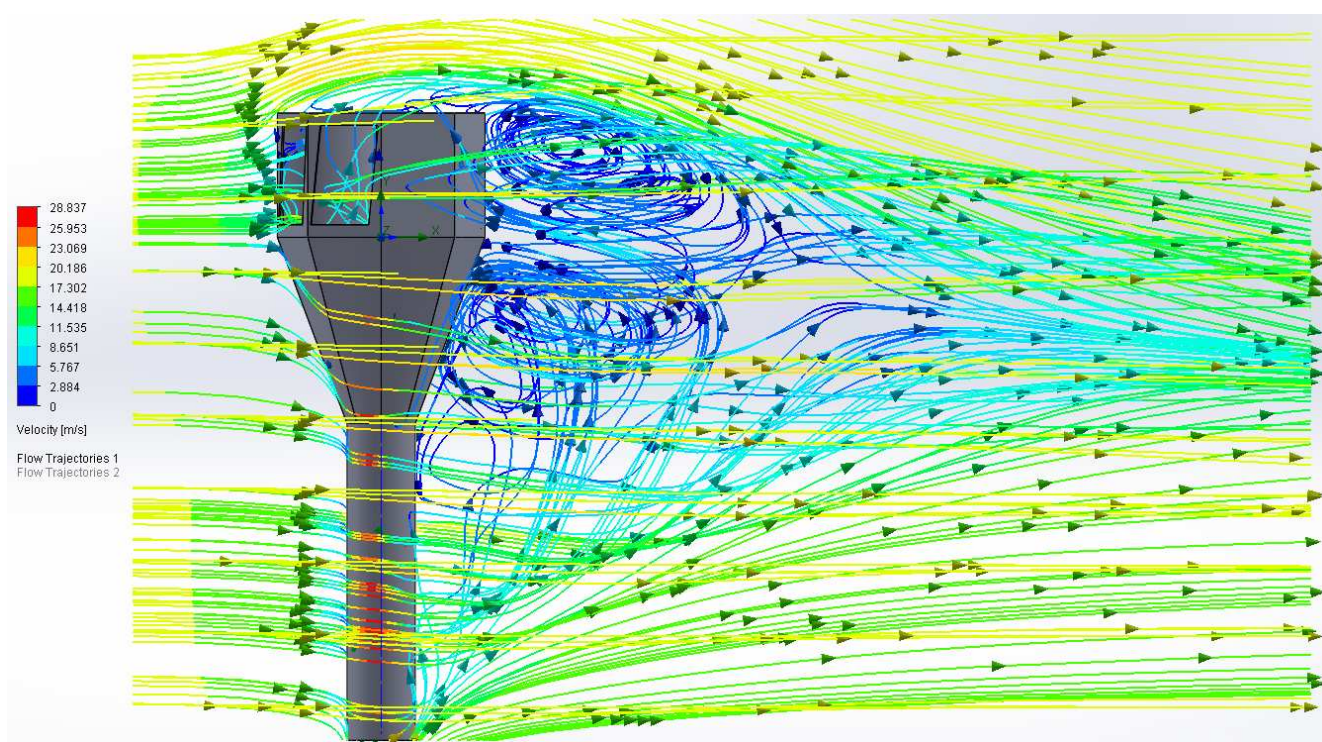
д)



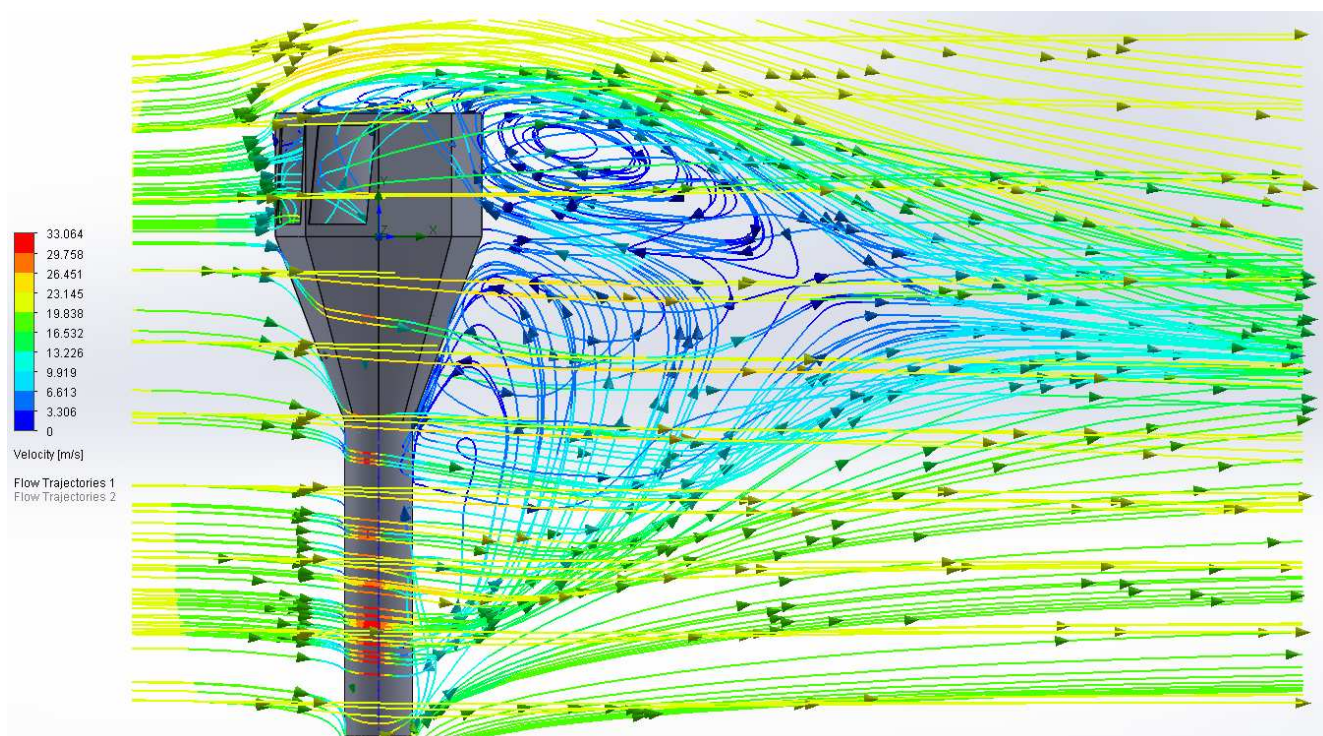
ж)



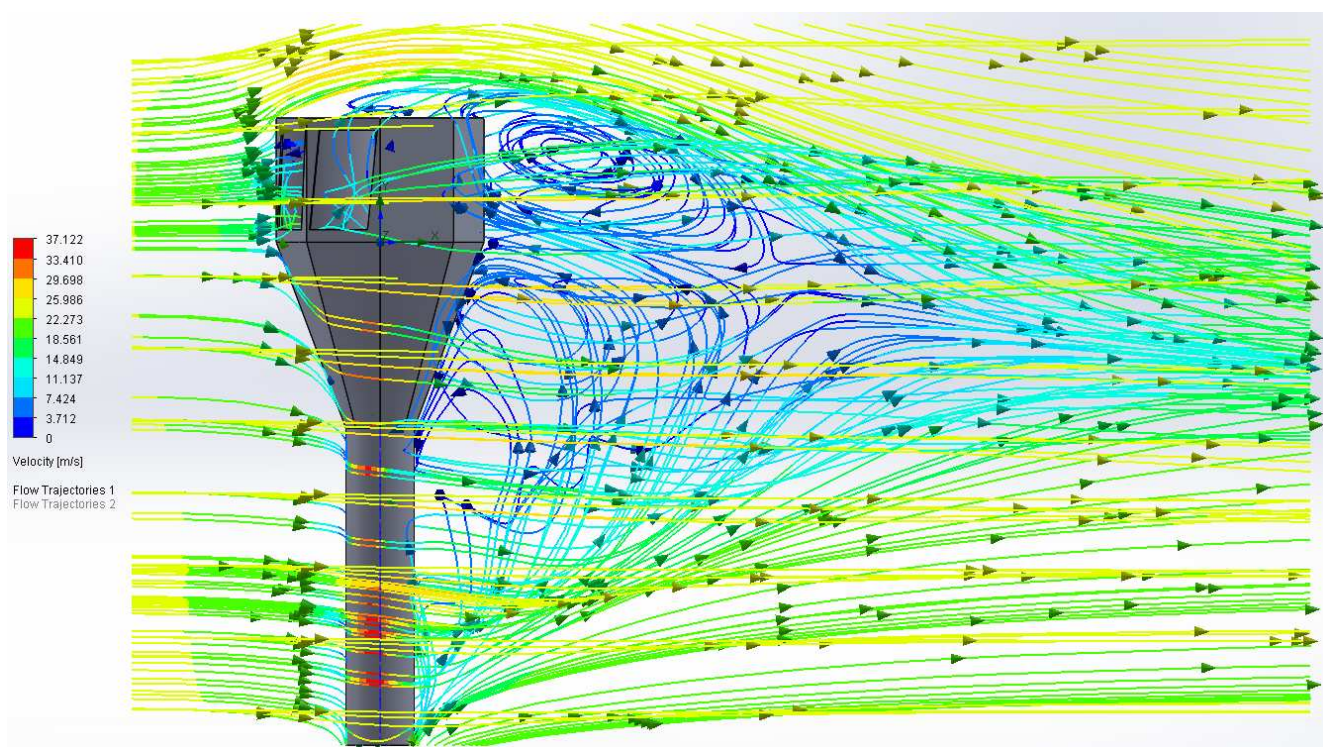
3)



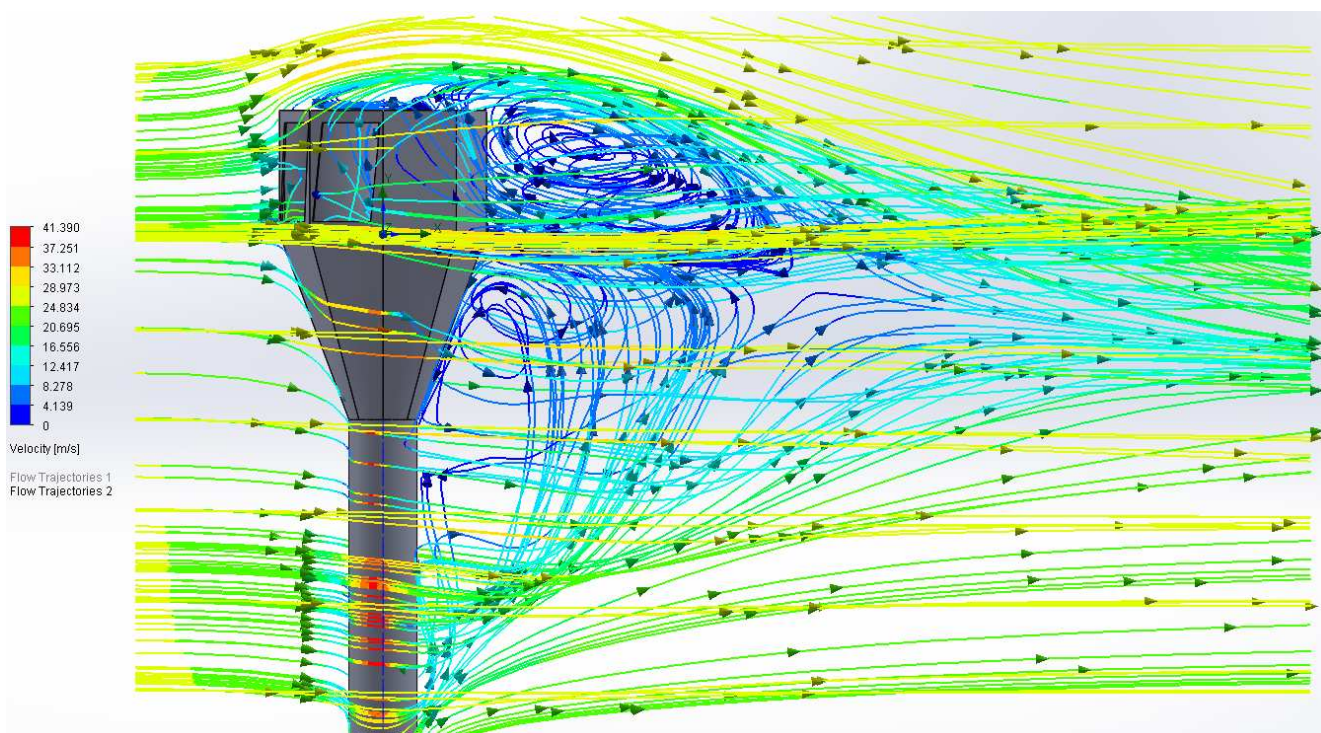
κ)



л)



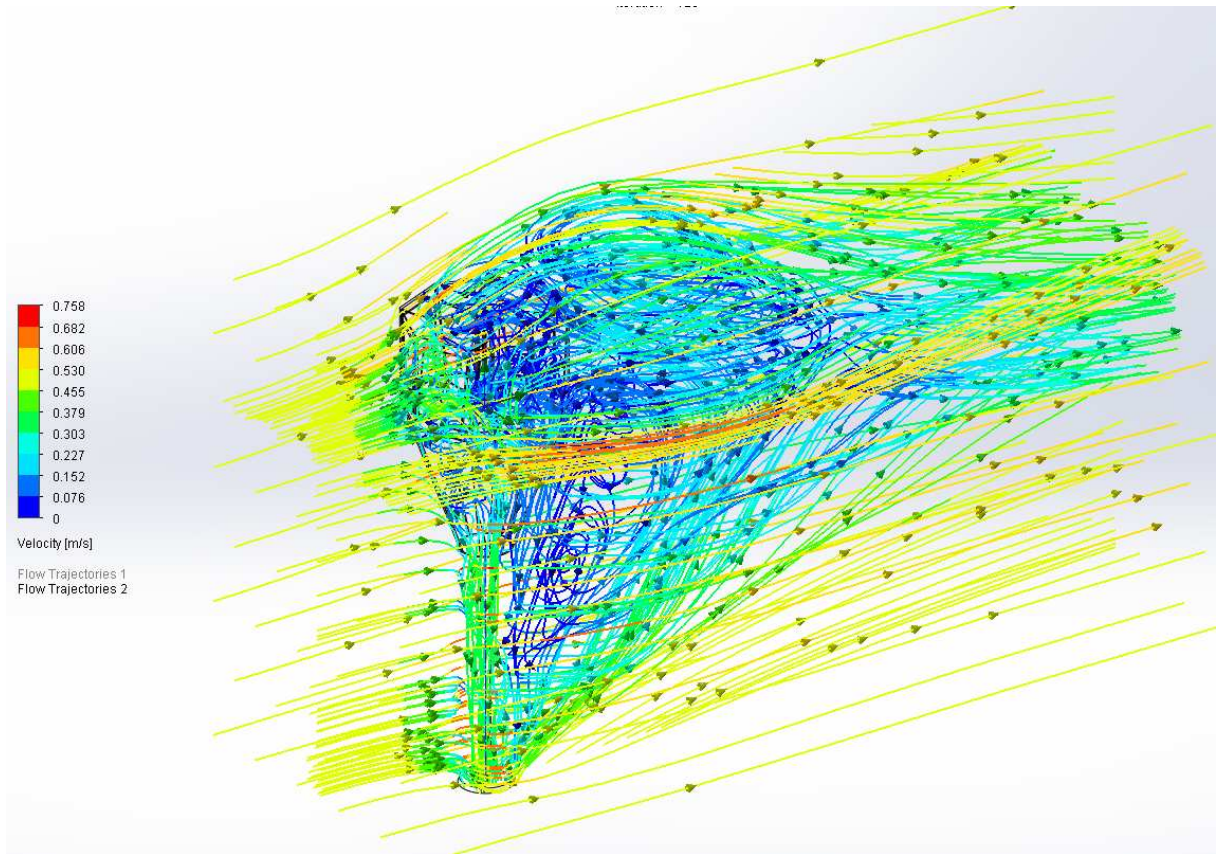
м)



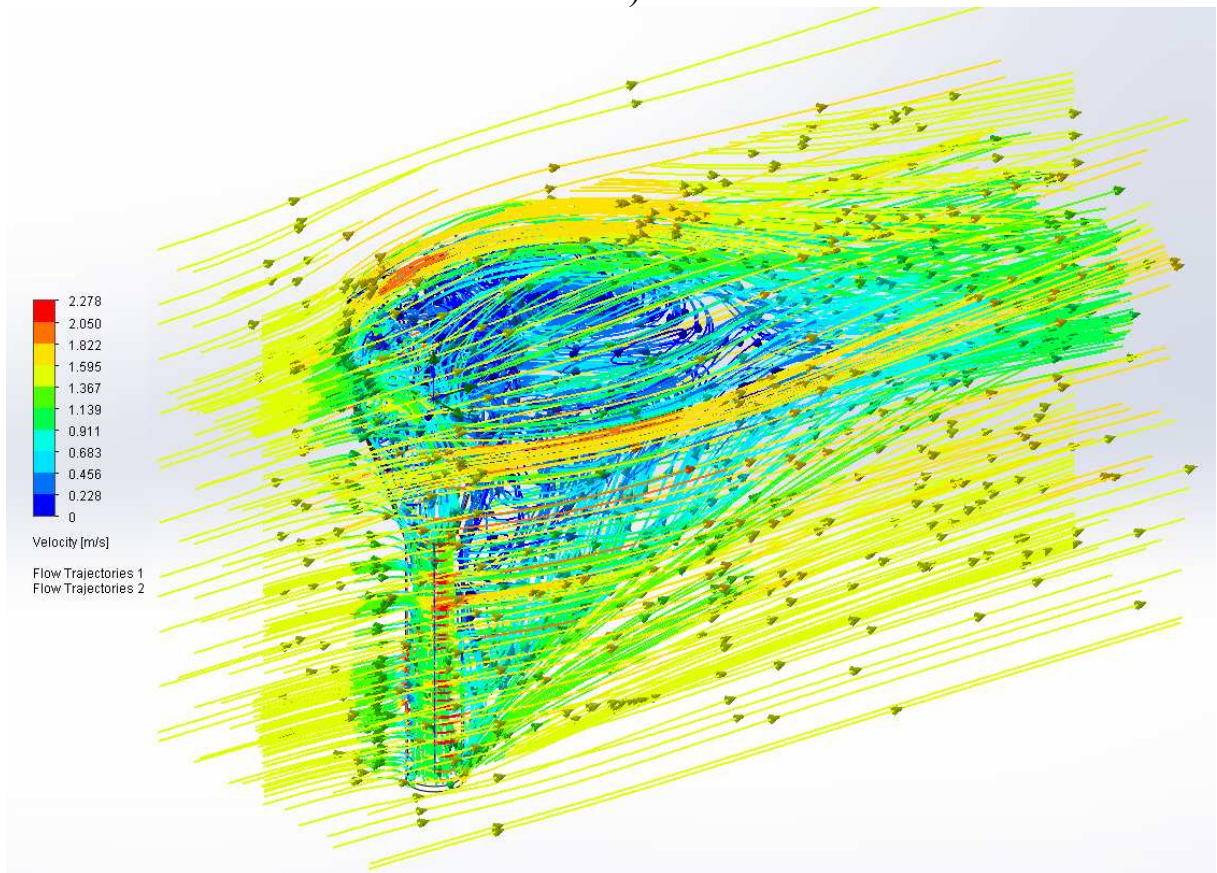
н)

Рис. 2.4. Моделювання процесу обтікання повітряним потоком вітровловлювача у вертикальній площині при швидкостях: а – 0,5 м/с; б – 1,5 м/с; в – 3 м/с; г – 5 м/с; д – 7,5 м/с; ж – 10 м/с; з – 12,5 м/с; к – 17,5 м/с; л – 20 м/с; м – 22,5 м/с; н – 25 м/с

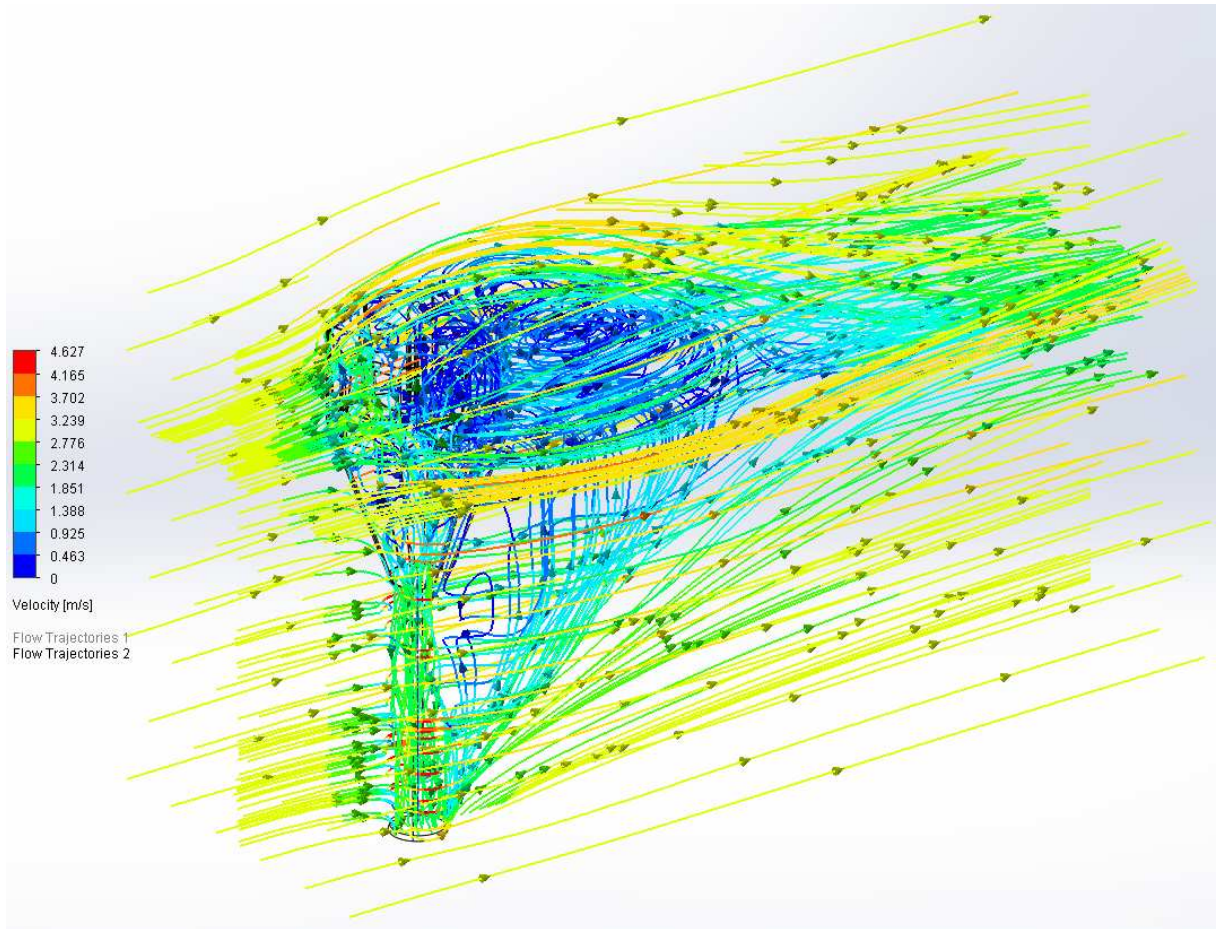
При низьких швидкостях повітряний потік демонструє рівномірне та плавне обтікання вітровловлювача з незначними змінами напрямку, швидкості потоку та мінімальною турбулентністю. Зі збільшенням швидкості до середніх значень збільшується тиск на передній частині вітровловлювача, що призводить до інтенсивнішого огинання. За вітровловлювачем утворюється виразніша зона низького тиску, яка сприяє збільшенню турбулентності та формуванню вихрових структур, що стають більш вираженими при швидкостях, наближених до 25 м/с.



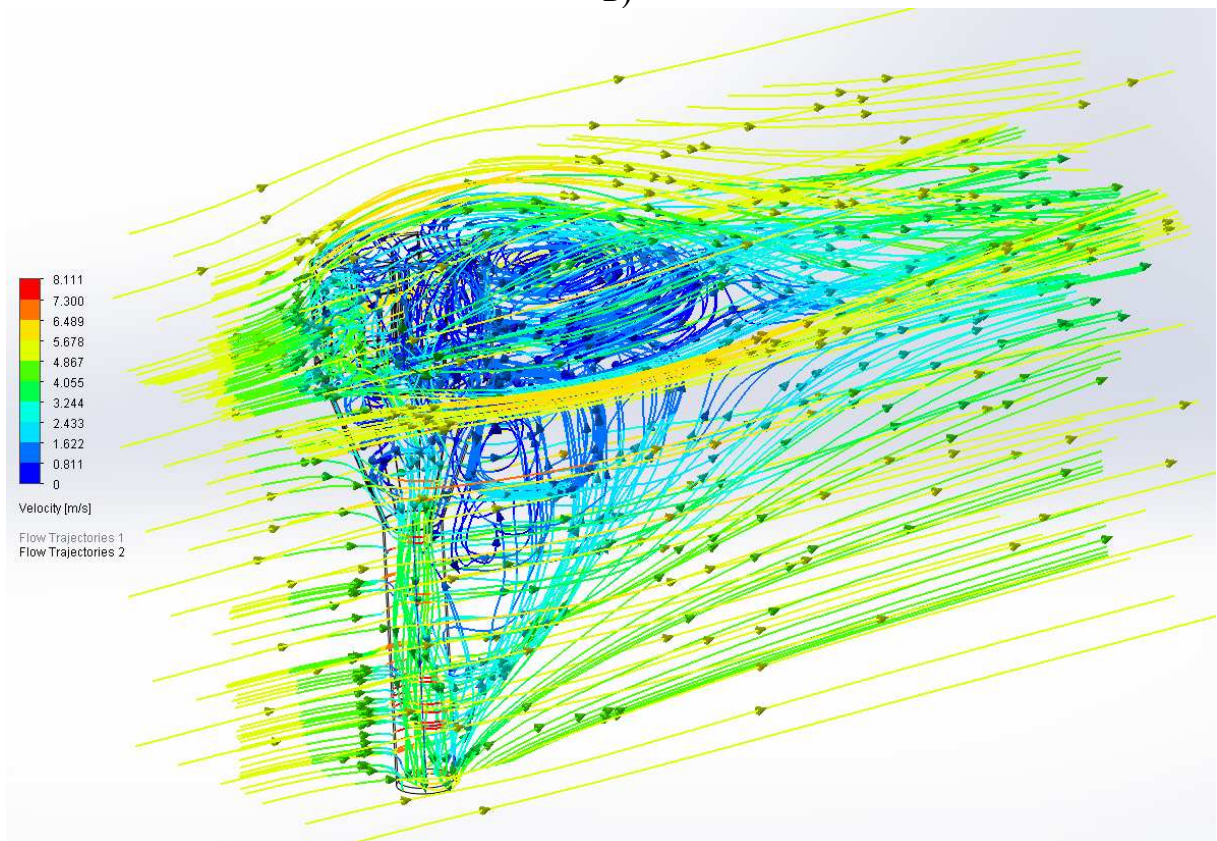
a)



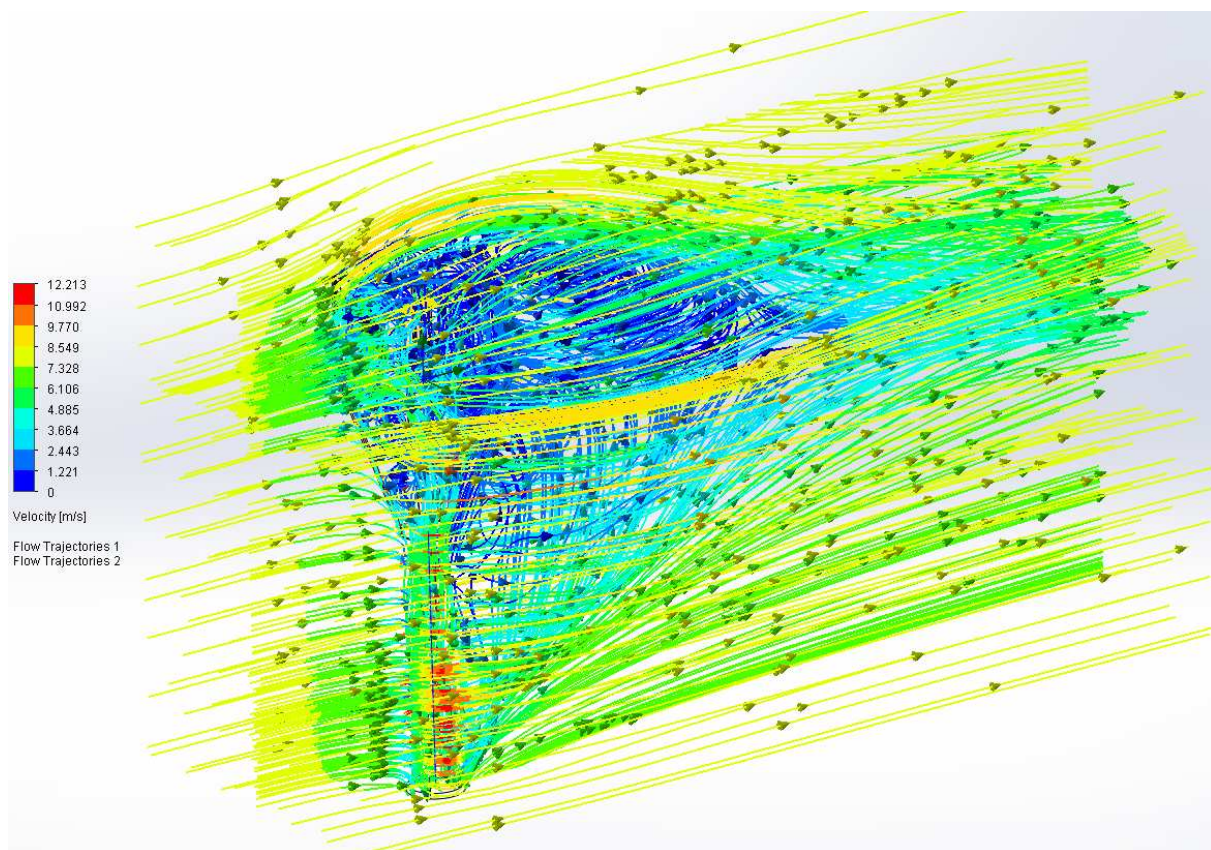
b)



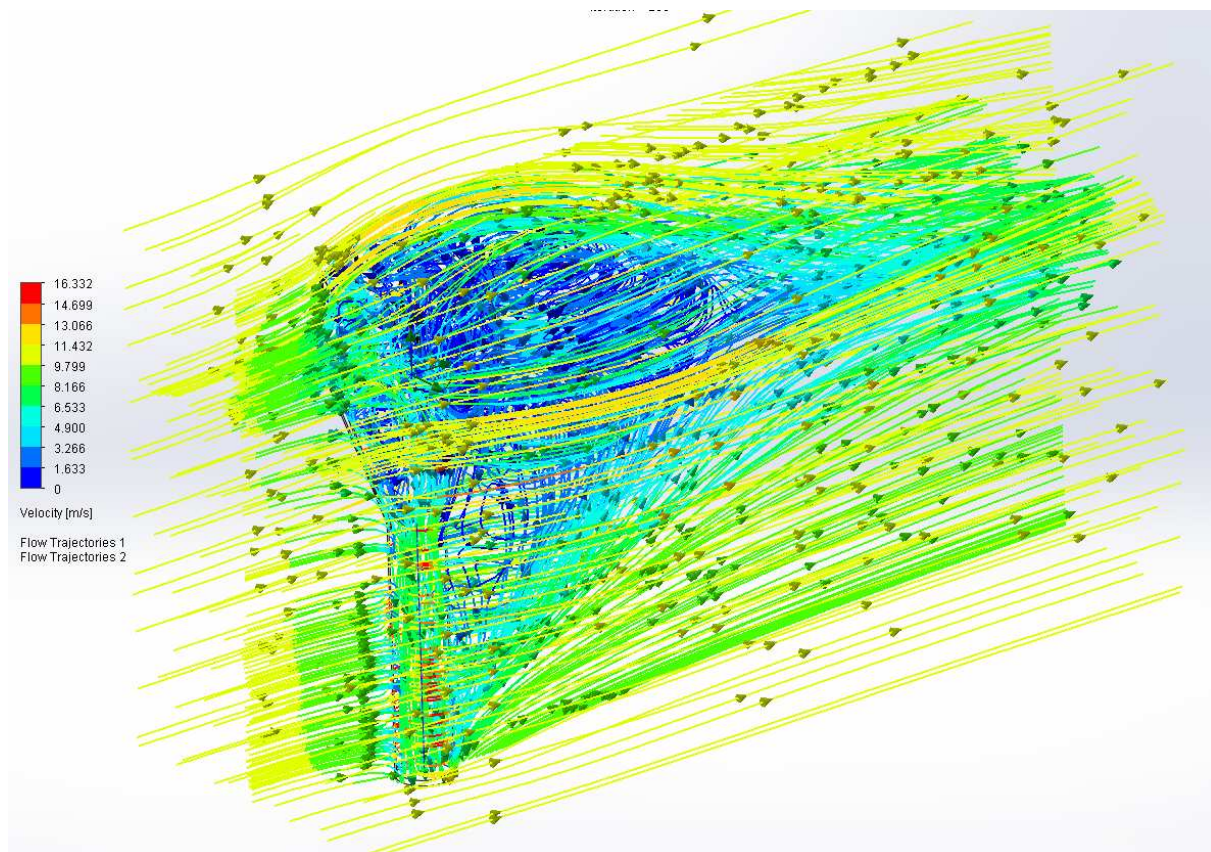
B)



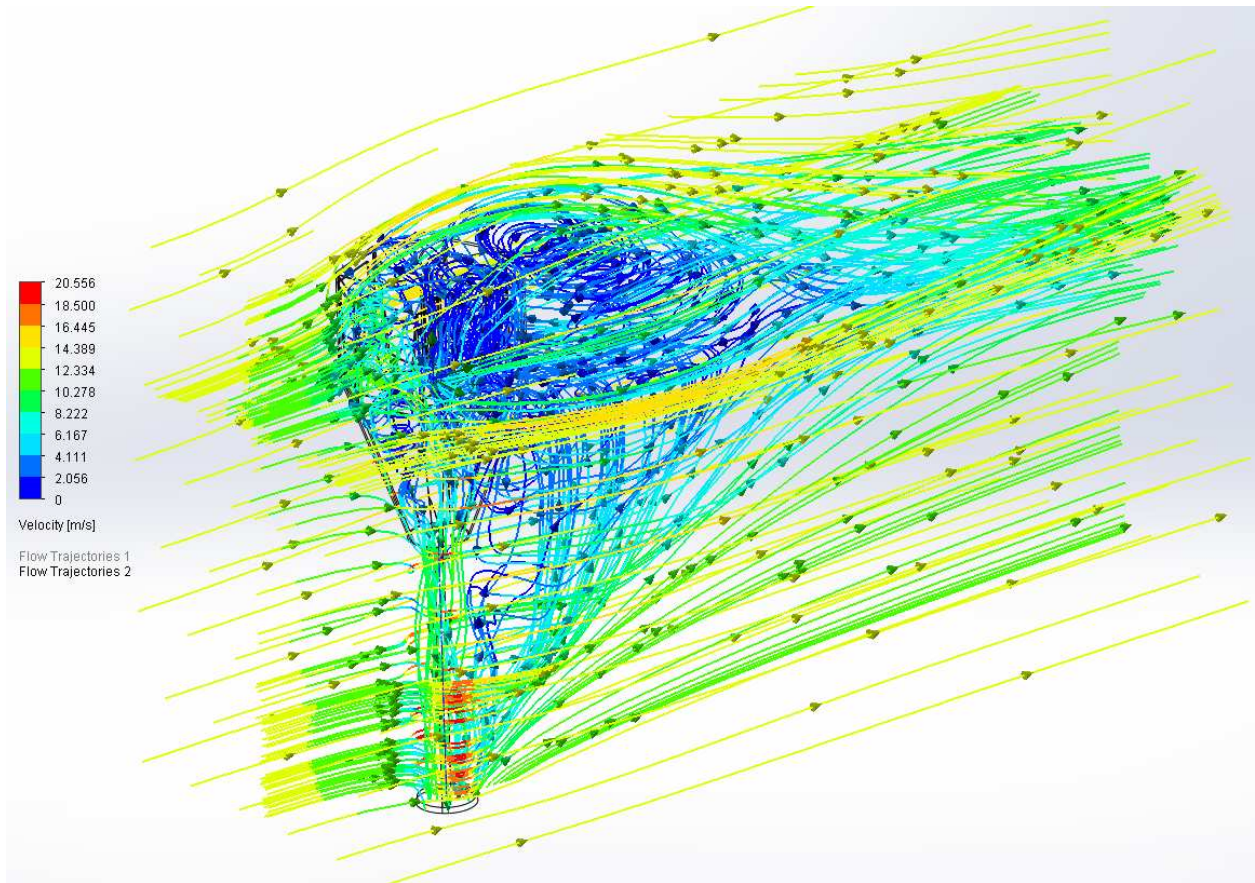
Г)



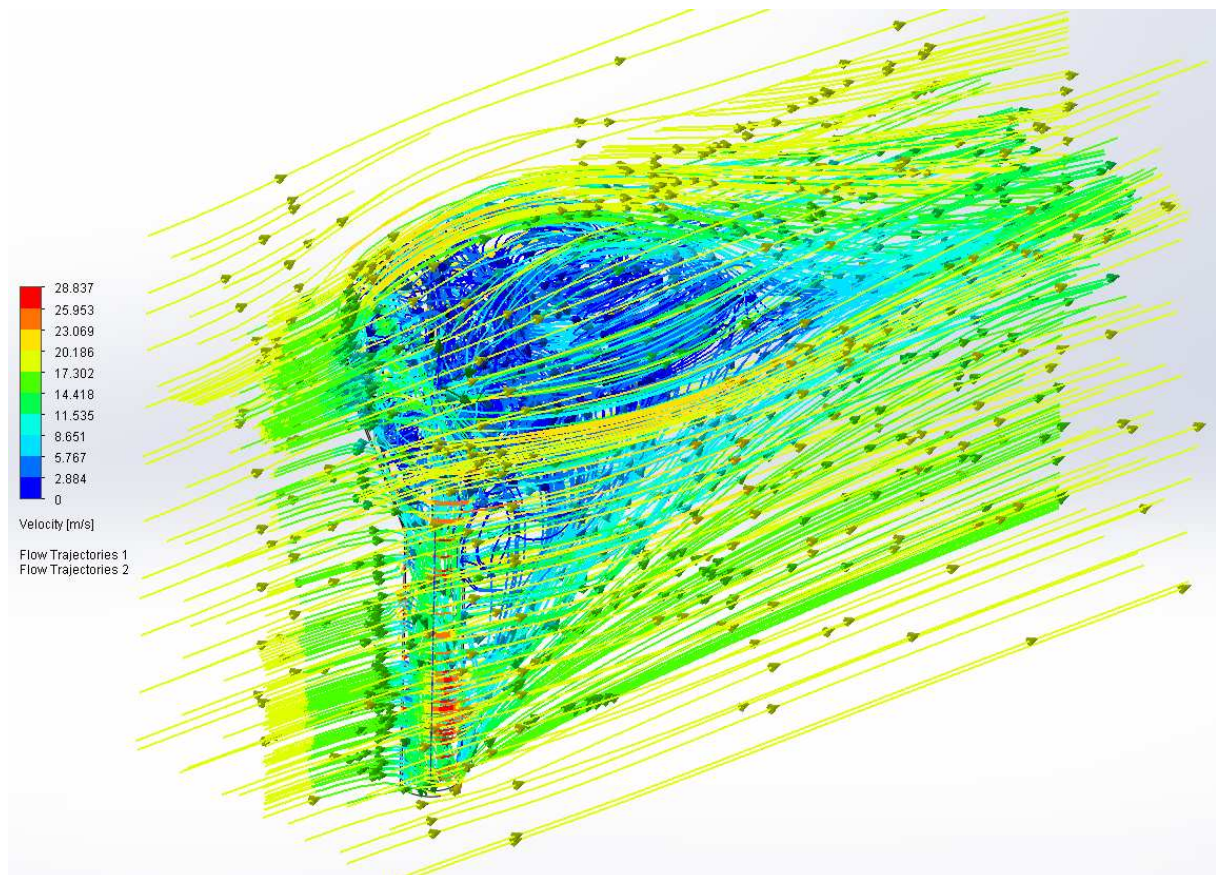
Д)



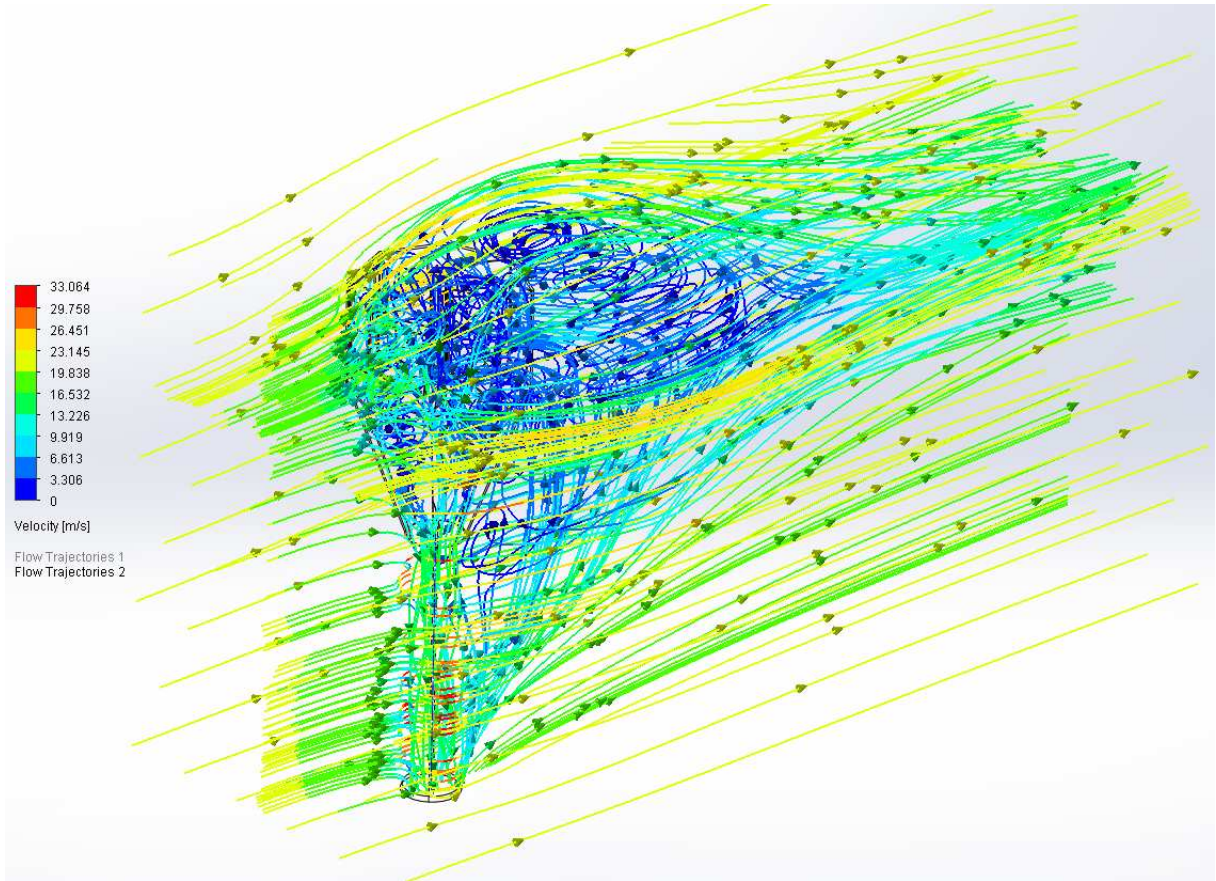
Ж)



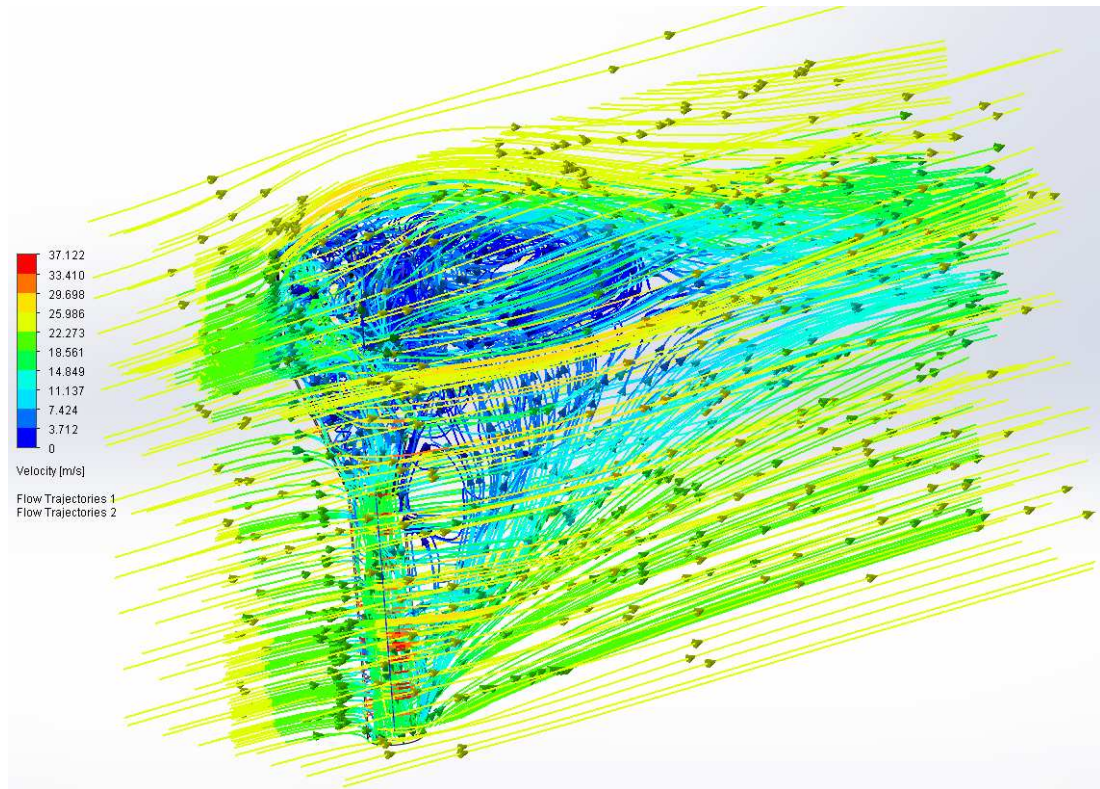
3)



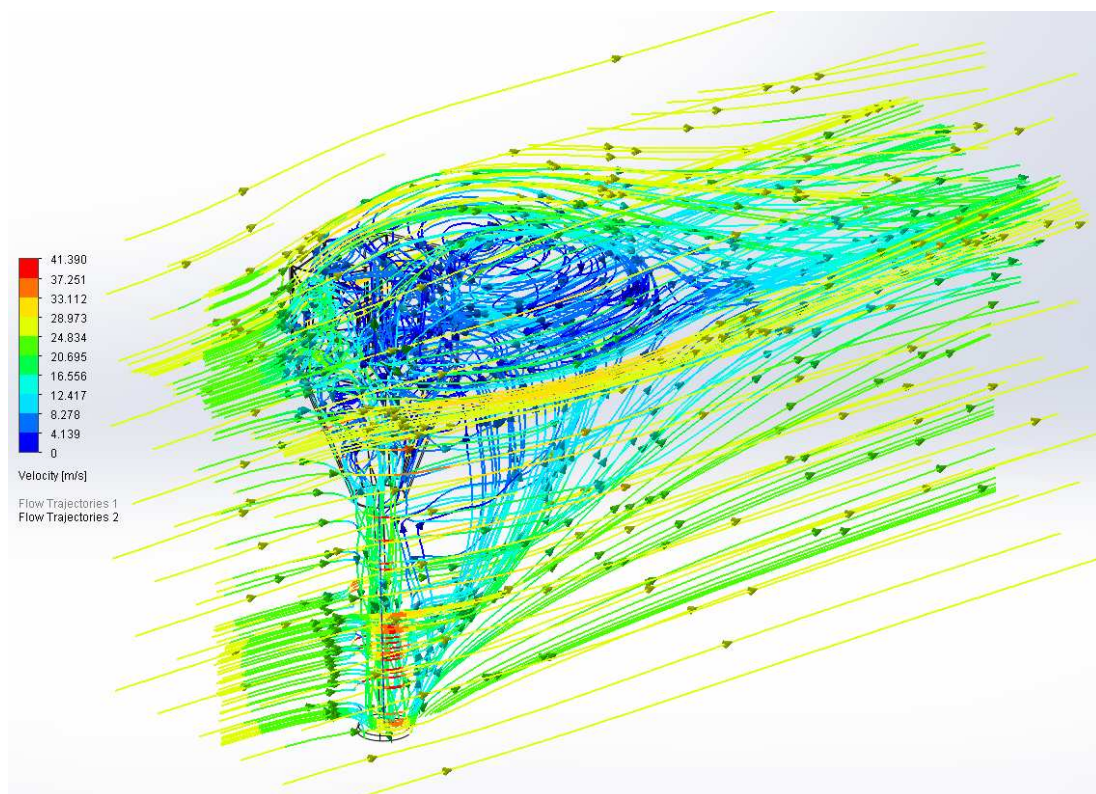
K)



Л)



М)



н)

Рис. 2.5. Моделювання повітряного потоку та його взаємодія з конструкцією вітровловлювача при швидкостях: а – 0,5 м/с; б – 1,5 м/с; в – 3 м/с; г – 5 м/с; д – 7,5 м/с; ж – 10 м/с; з – 12,5 м/с; к – 17,5 м/с; л – 20 м/с; м – 22,5 м/с; н – 25 м/с

Для спрощення моделювання процесу обтікання повітряним потоком вітровловлювача було змодельовано лише область навколо вітровловлювача.

2.3 Комп'ютерне моделювання роботи пасивної системи вентиляції енергоощадного будинку

Моделювання впливу природної вентиляції на мікроклімат енергоощадного будинку проводилося на прикладі окремої кімнати для двох кліматичних умов: теплого та холодного періодів року, що дозволяє комплексно оцінити вплив припливного повітря на мікроклімат приміщення за різних кліматичних умов. Геометричні розміри кімнати, для якої було проведено моделювання, та схема

розміщення припливних і витяжних елементів наведено на рисунку 2.6. Температура припливного повітря, з урахуванням кліматичних умов Кривого Рогу, була прийнята « -21°C » у холодний період року та « $+20^{\circ}\text{C}$ » у теплий період. Внутрішня температура повітря прийнята « $+20^{\circ}\text{C}$ », атмосферний тиск 101325 Па. Моделювання впливу природної вентиляції на мікроклімат енергоощадного будинку було виконано за допомогою ліцензійного програмного забезпечення Solidworks Flow Simulation.

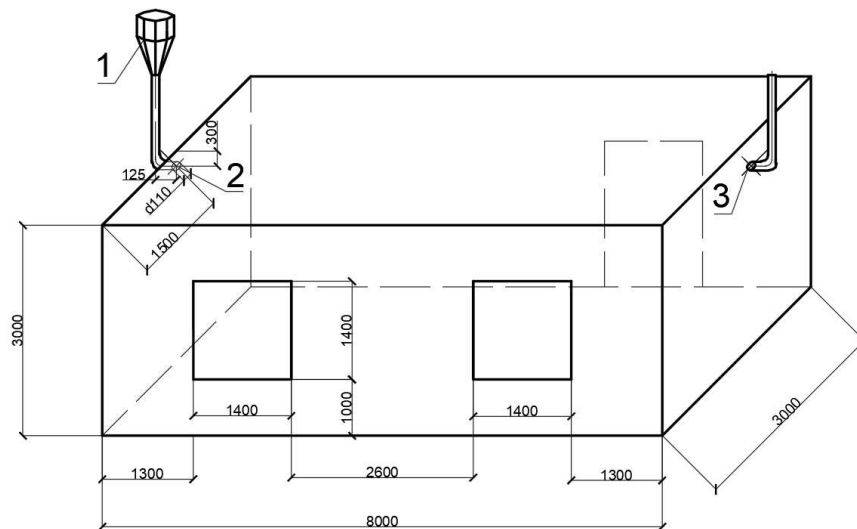


Рис. 2.6. Схема розташування припливних і витяжних елементів у кімнаті енергоощадного будинку: 1 – вітровловлювач; 2 – припливний отвір; 3 – витяжний отвір

Для виявлення оптимальних умов ефективного повітрообміну було обрано продуктивність вітровловлювача: 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80 та $100 \text{ м}^3/\text{год}$.

У результатах моделювання представлено розподілення швидкості та температури повітряного потоку у фронтальній і горизонтальній площинах відносно осей вітровловлювача. Фронтальні площини ілюструють розподілення повітряного потоку по висоті приміщення, тоді як горизонтальні площини показують його розповсюдження по ширині приміщення. Щоб наочно продемонструвати розподілення повітряного потоку безпосередньо біля

припливного отвору, додатково представлено фронтальну площину на відстані 5 мм від вхідного отвору. Це дозволяє більш детально спостерігати за поведінкою повітряного потоку в зоні, де він починає поширюватися в приміщенні, та наочно оцінити, як змінюються температурні показники та швидкість потоку залежно від витрати повітря та відстані від припливного обладнання (вітровловлювача).

2.3.1. Результати моделювання для умов теплого періоду року

При мінімальній витраті в $5 \text{ м}^3/\text{год}$ рух повітря відбувається рівномірно, без різких змін напрямку. Через низьку швидкість потік не проникає далеко від виходу вітровловлювача та швидко розсіюється в приміщенні. Така витрата не викликає помітних турбулентностей або різких змін у повітряному потоці (рис. 2.7).

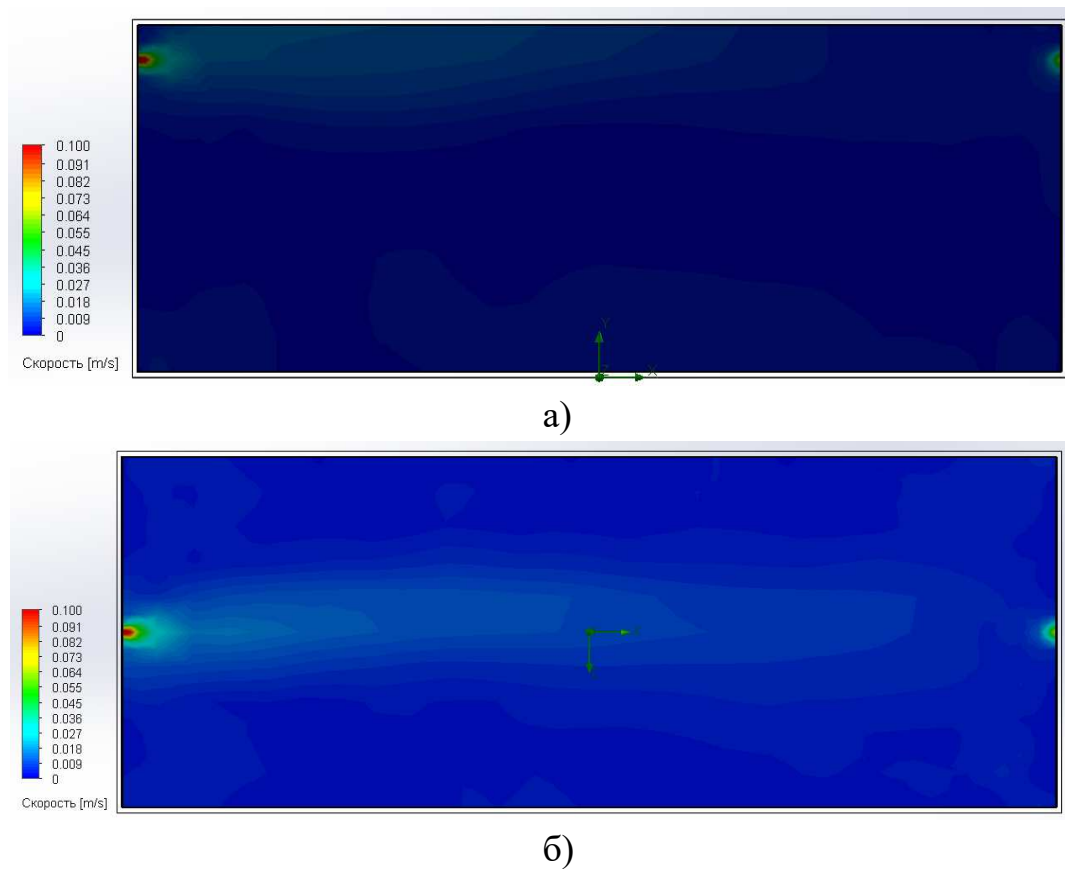


Рис. 2.7. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в теплий період року при витраті $5 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині

Зі збільшенням витрати до $10 \text{ м}^3/\text{год}$ повітря починає проникати далі в приміщення. Потік все ще залишається стабільним, а змішування повітряного потоку з внутрішнім повітрям приміщення відбувається поступово. Не спостерігається утворення турбулентних зон, але потік починає мати помітніший вплив на циркуляцію в приміщенні (рис. 2.8).

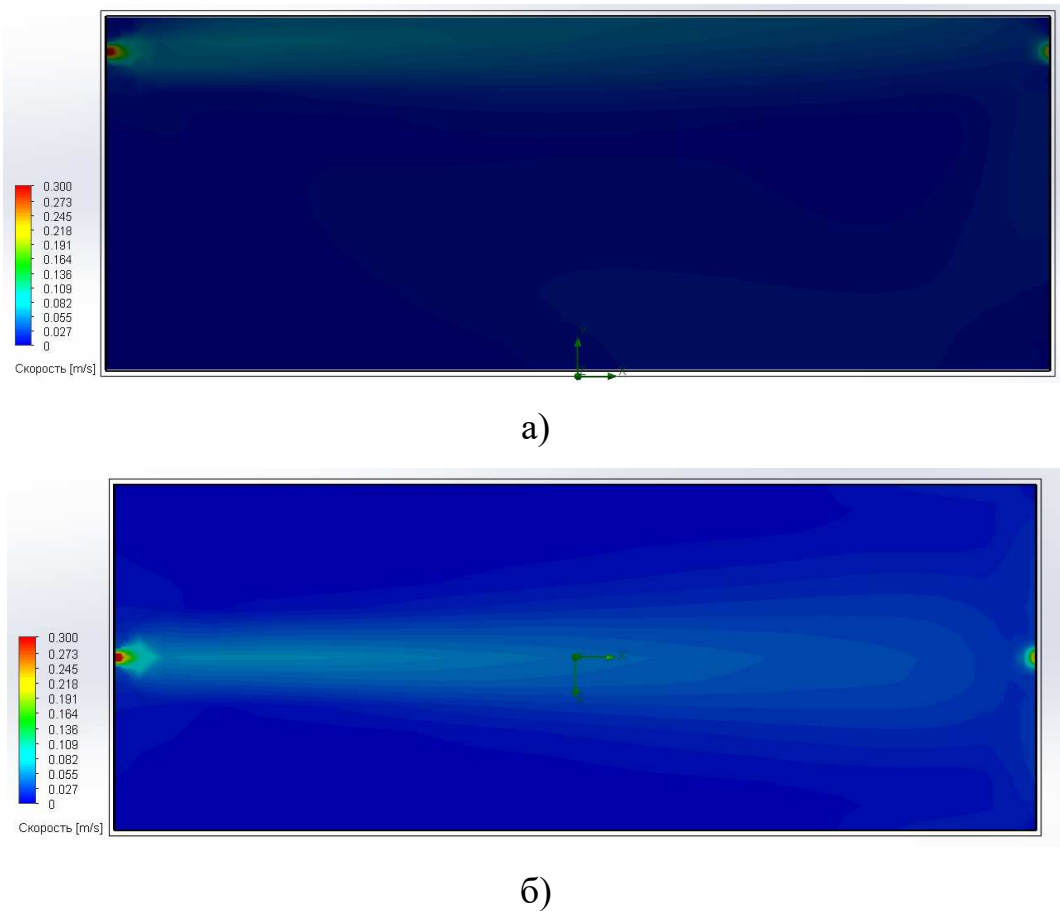
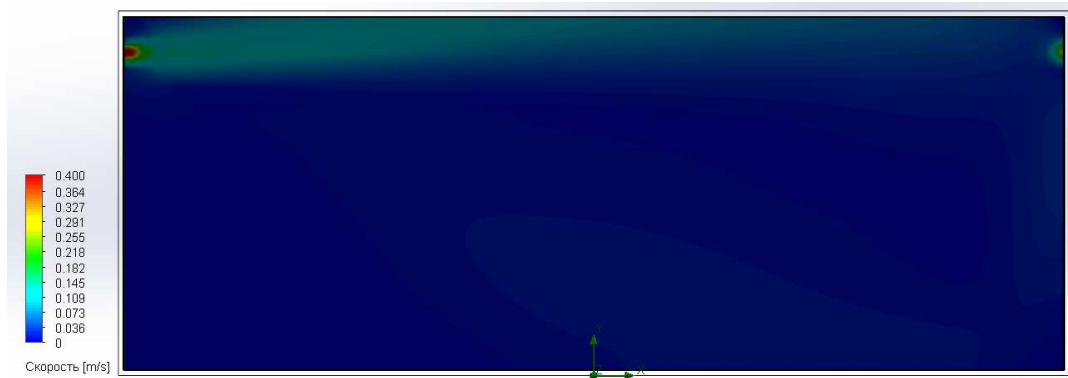
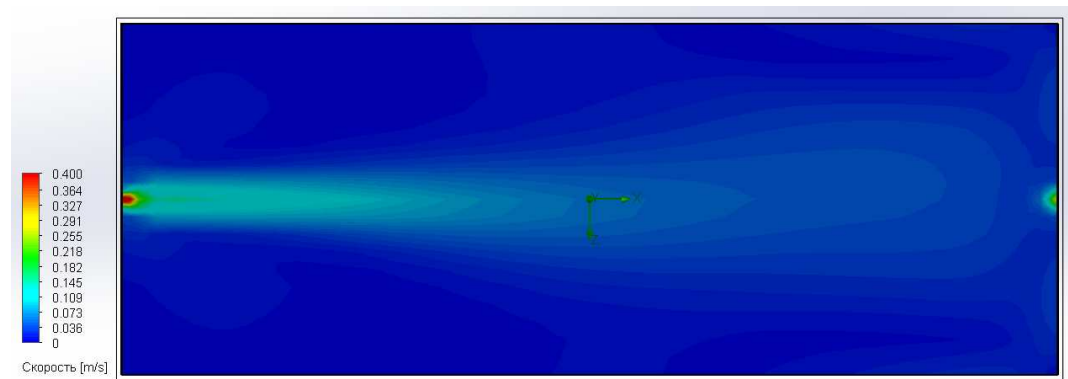


Рис. 2.8. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в теплий період року при витраті $10 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині

При витраті $15 \text{ м}^3/\text{год}$ потік повітря стає ще більш вираженим. Повітря проникає глибше в приміщення, створюючи більш активну циркуляцію. Стає помітним утворення локальних зон повітряного руху (рис. 2.9).



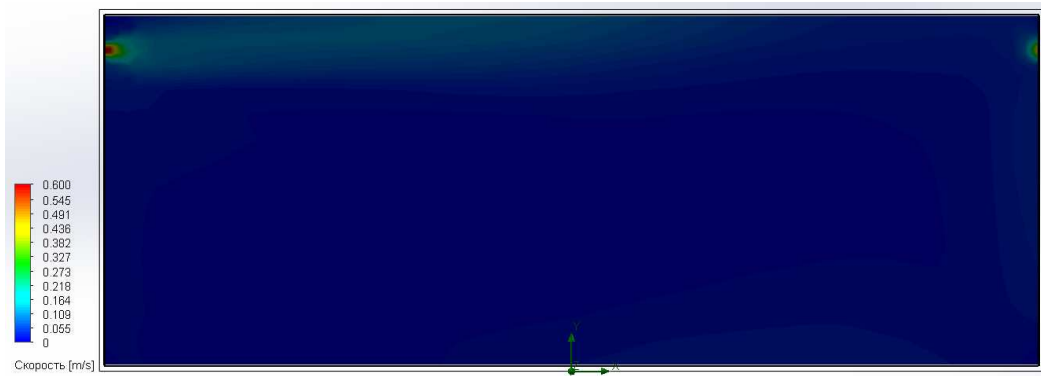
а)



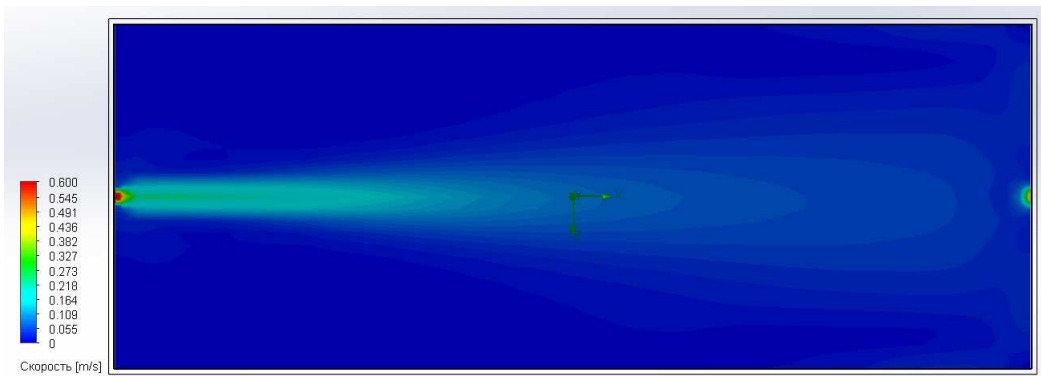
б)

Рис. 2.9. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в теплий період року при витраті $15 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині

При витраті $20 \text{ м}^3/\text{год}$ повітря рухається ще швидше, проникаючи по всьому об'єму приміщення. Це призводить до збільшення ефективності повітрообміну й більш рівномірного розподілення повітря по приміщенню. У цей момент потік починає створювати незначні турбулентні зони в місцях найбільш активного руху повітря (рис. 2.10).



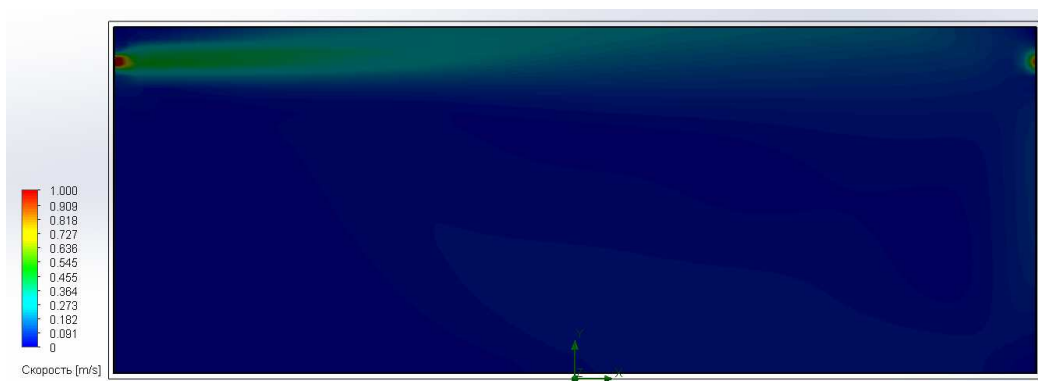
а)



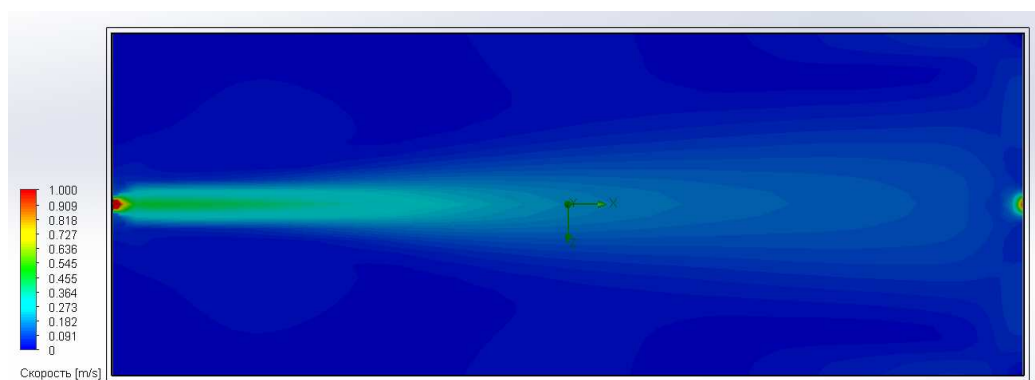
б)

Рис. 2.10. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в теплий період року при витраті $20 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині

При збільшенні витрати до $40 \text{ м}^3/\text{год}$ потік повітря стає набагато інтенсивнішим. Повітряний потік швидко розподіляється по приміщенню, але також починають з'являтися помітні зони турбулентності поблизу вітровловлювача. Це може призводити до відчуття руху повітря, що може стати джерелом дискомфорту для мешканців (рис. 2.11).



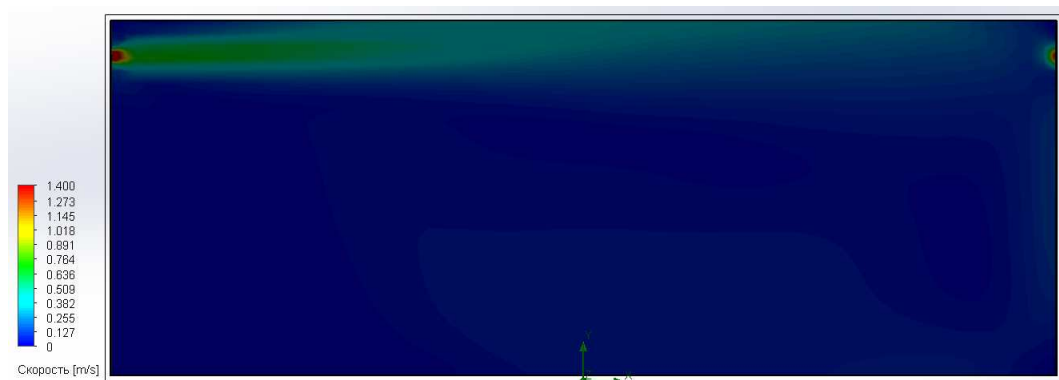
а)



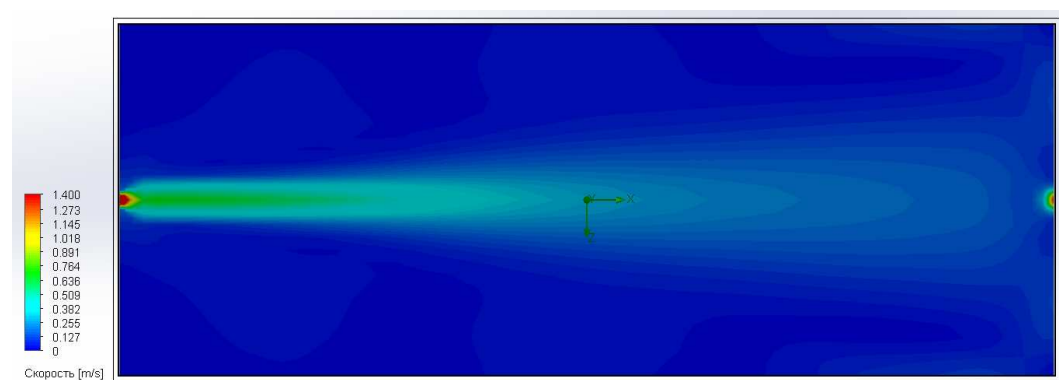
б)

Рис. 2.11. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в теплий період року при витраті $40 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині

При витраті $60 \text{ м}^3/\text{год}$ потік повітря швидко циркулює по приміщенню, утворюються чіткіші турбулентні зони поблизу виходу вітровловлювача, що може вплинути на комфорт у приміщенні, особливо в зонах, що безпосередньо прилягають до місця виходу повітряного потоку (рис.2.12).



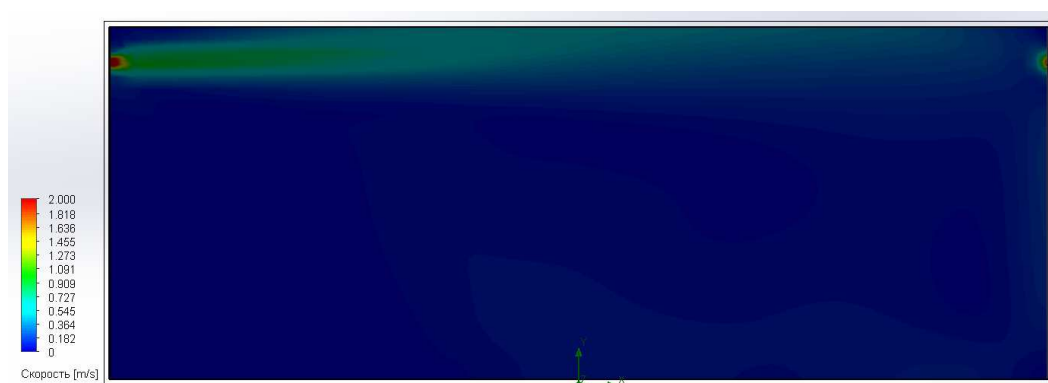
а)



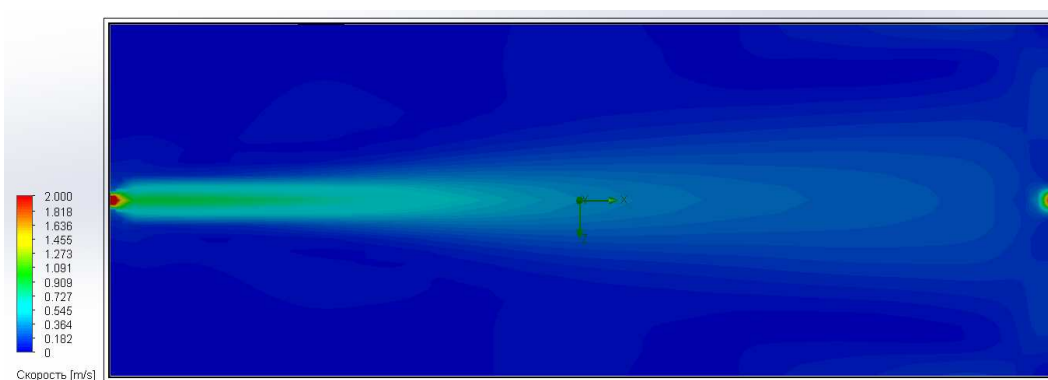
б)

Рис. 2.12. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в теплий період року при витраті $60 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині

При витраті $80 \text{ м}^3/\text{год}$ повітря проникає в усі частини приміщення, але турбулентні зони стають більш вираженими. Це створює ризик для комфортних умов, оскільки швидкий потік може призвести до відчуття протягів або різкої зміни температури в певних зонах приміщення (рис. 2.13).



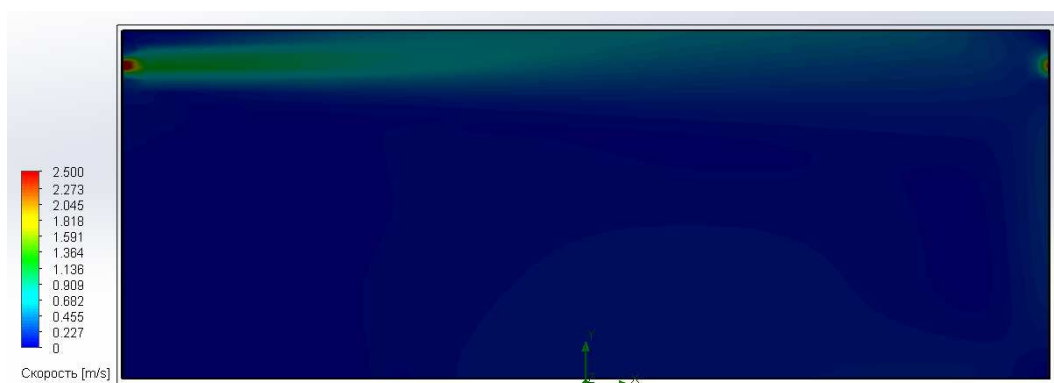
а)



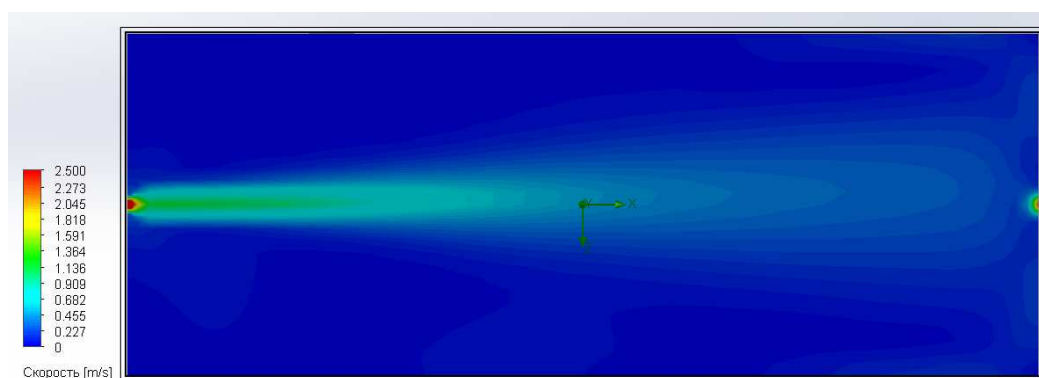
б)

Рис. 2.13. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в теплий період року при витраті $80 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині

Максимальна витрата $100 \text{ м}^3/\text{год}$ забезпечує найбільш інтенсивний повітряний потік. Турбулентність біля виходу з вітровловлювача стає значною, і рух повітря може створювати неприємні відчуття для мешканців через надмірну швидкість і нерівномірне розподілення повітряних потоків по всьому приміщенню.



а)



б)

Рис. 2.14. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в теплий період року при витраті 100 м³/год: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині

Зі збільшенням витрати припливного повітря через вітровловлювач поступово зростає здатність повітряного потоку рівномірно розподілятися по приміщенню. При витратах в межах 15-40 м³/год повітряний потік добре циркулює без утворення значної турбулентності, а при високих витратах (від 60 м³/год і більше) починають з'являтися турбулентні зони, що можуть створювати дискомфорт. Однак завдяки можливості регулювання температури, швидкості та напрямку руху припливного повітря, вітровловлювач дозволяє більш гнучко контролювати параметри мікроклімату в приміщенні.

2.3.2. Результати моделювання для умов холодного періоду року

При мінімальній витраті припливного повітря в $5 \text{ м}^3/\text{год}$ потік рухається згори донизу з низькою швидкістю. Потік повітря поступово розширюється донизу, заповнюючи нижні шари приміщення. Через низьку інтенсивність потоку майже не спостерігається значного перемішування повітря, а холодне повітря накопичується ближче до підлоги, утворюючи локальну холодну зону (рис. 2.15).

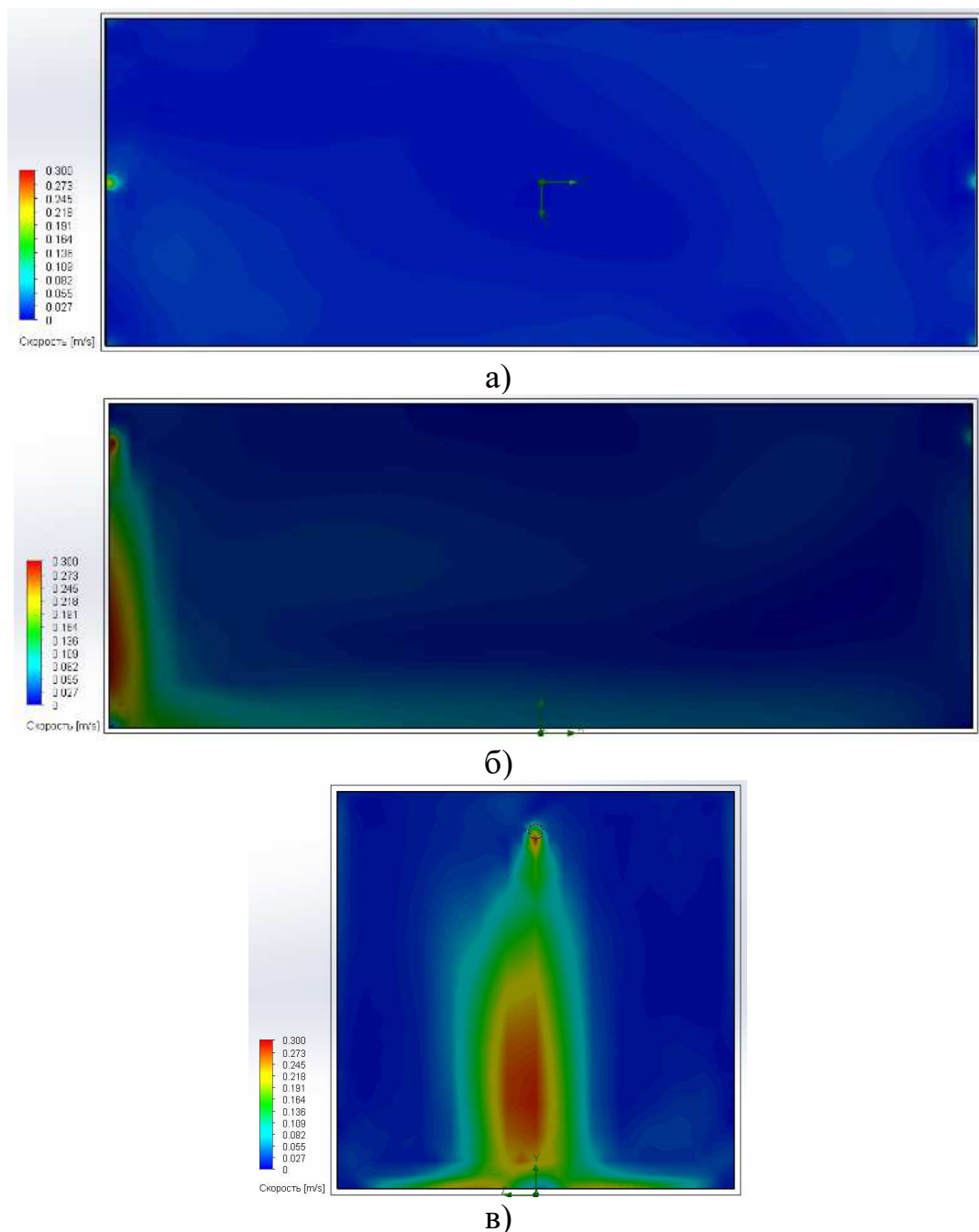
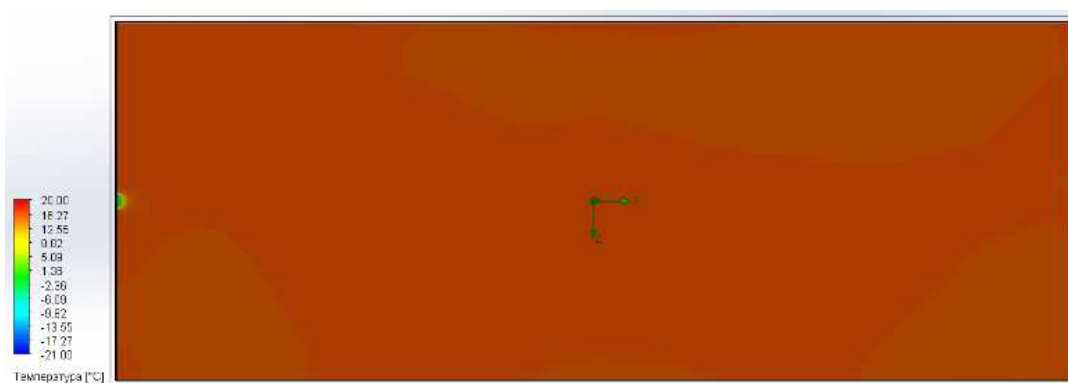


Рис. 2.15. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в

холодний період року при витраті 5 м³/год: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від вхідного отвору

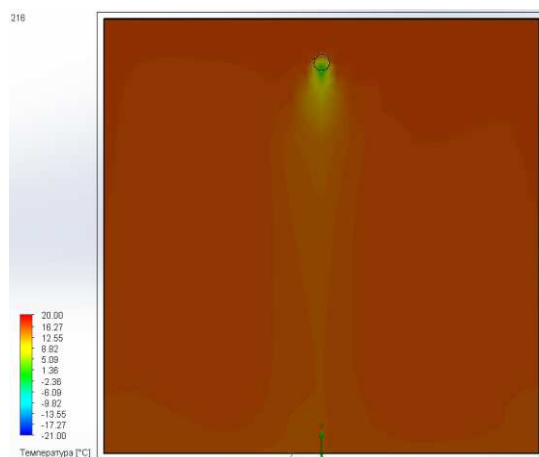
Температурний градієнт між припливним повітрям та внутрішнім теплим є значним. Через слабе перемішування тепле повітря залишається у верхніх шарах приміщення, а нижня частина характеризується значно нижчою температурою (2.16).



а)



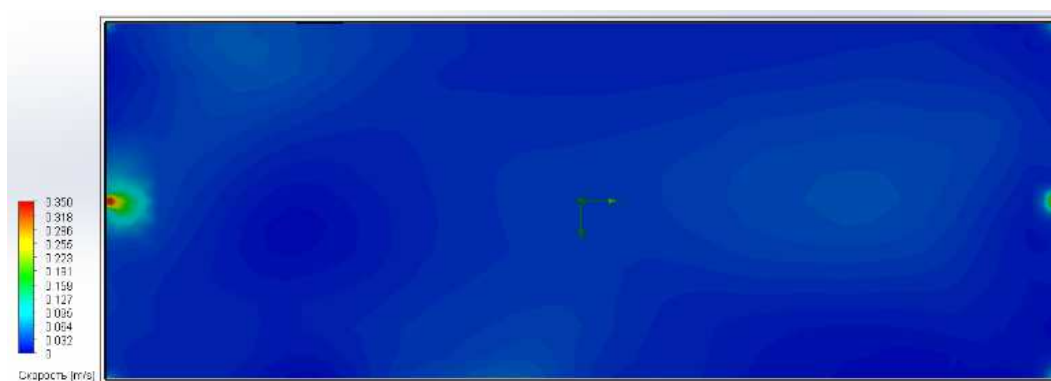
б)



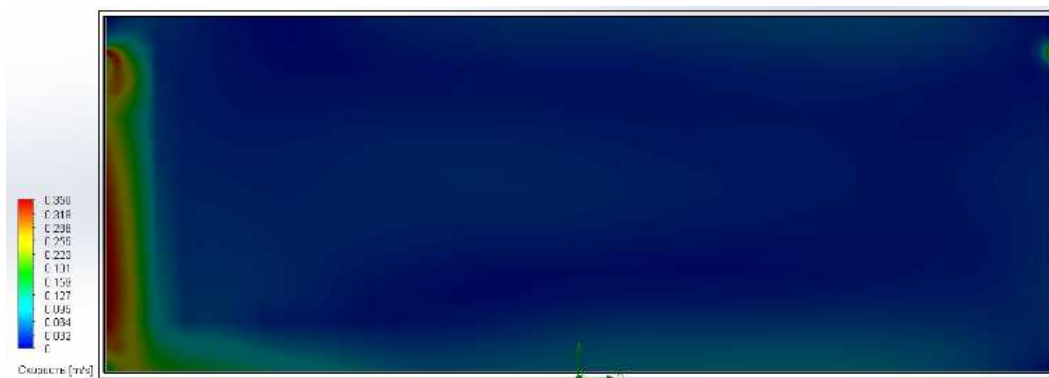
в)

Рис. 2.16. Розподілення температури повітряного потоку в приміщенні в холодний період року при витраті $5 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від входного отвору

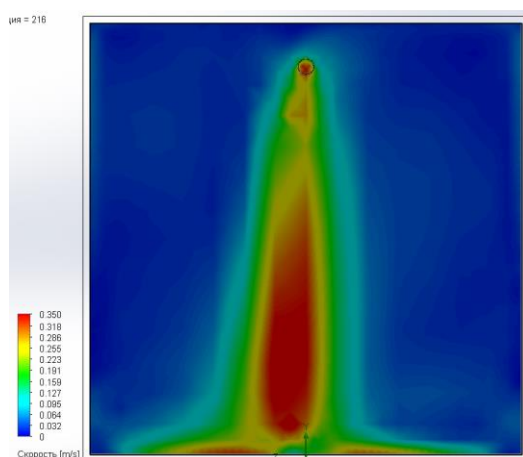
При витраті $10 \text{ м}^3/\text{год}$ припливний потік зберігає спрямованість згори донизу, але стає інтенсивнішим, більш чітким і поширюється далі. Поблизу підлоги швидкість знижується, що сприяє поступовому поширенню холодного повітря в нижніх шарах (2.17).



а)



б)



в)

Рис. 2.17. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в холодний період року при витраті $10 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від вхідного отвору

Утворюється зона низької температури в нижній частині, яка поступово зміщується з теплим повітрям. Проте охолодження приміщення залишається нерівномірним через недостатню інтенсивність перемішування (рис. 2.18).

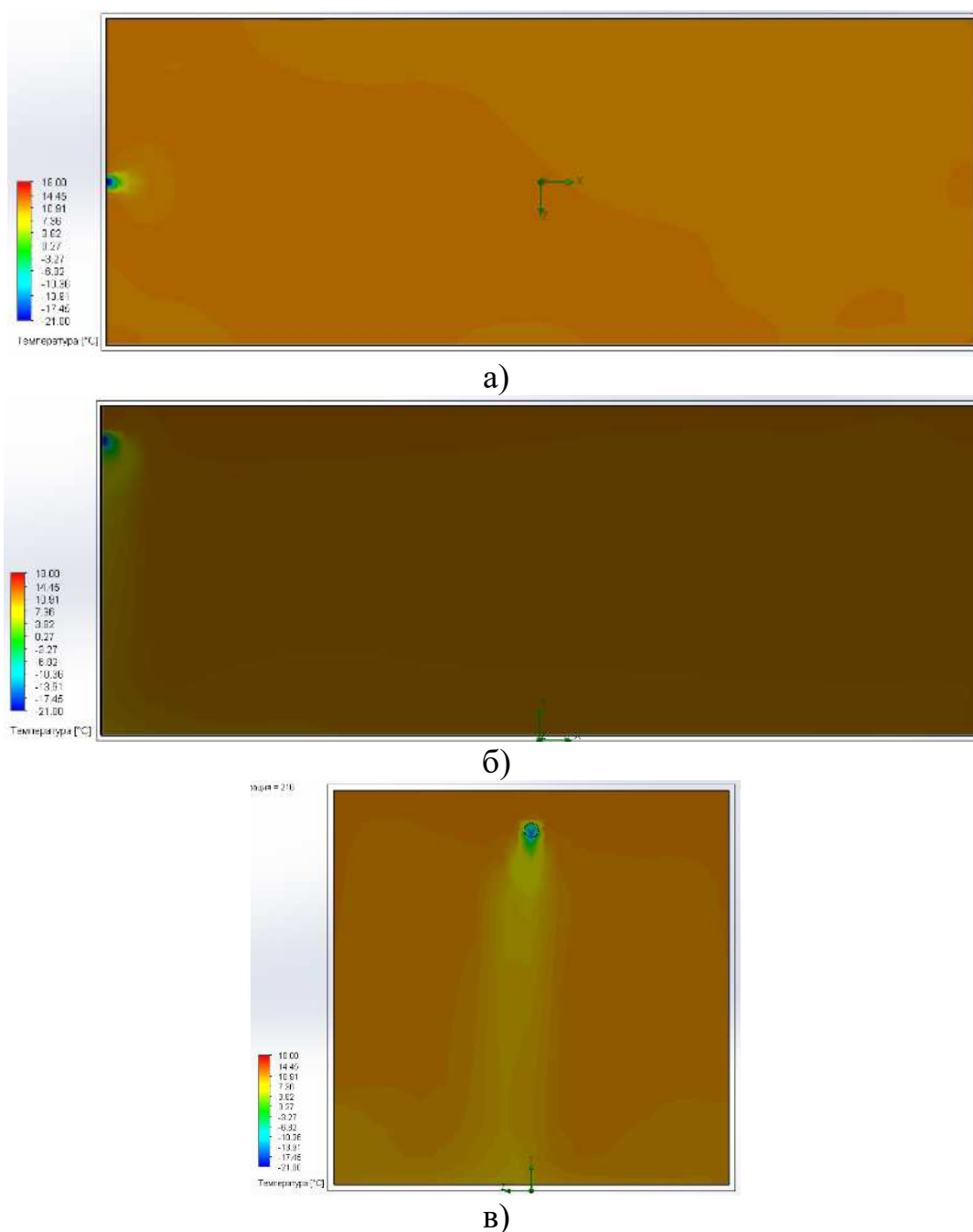


Рис. 2.18. Розподілення температури повітряного потоку в приміщенні в холодний період року при витраті $10 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від вхідного отвору

При витраті $15 \text{ м}^3/\text{год}$ потік зберігає високу спрямованість, але активніше розширюється в нижніх шарах приміщення. Зони з підвищеною швидкістю

з'являються ближче до підлоги, що сприяє більш інтенсивному перемішуванню повітря (рис. 2.19).

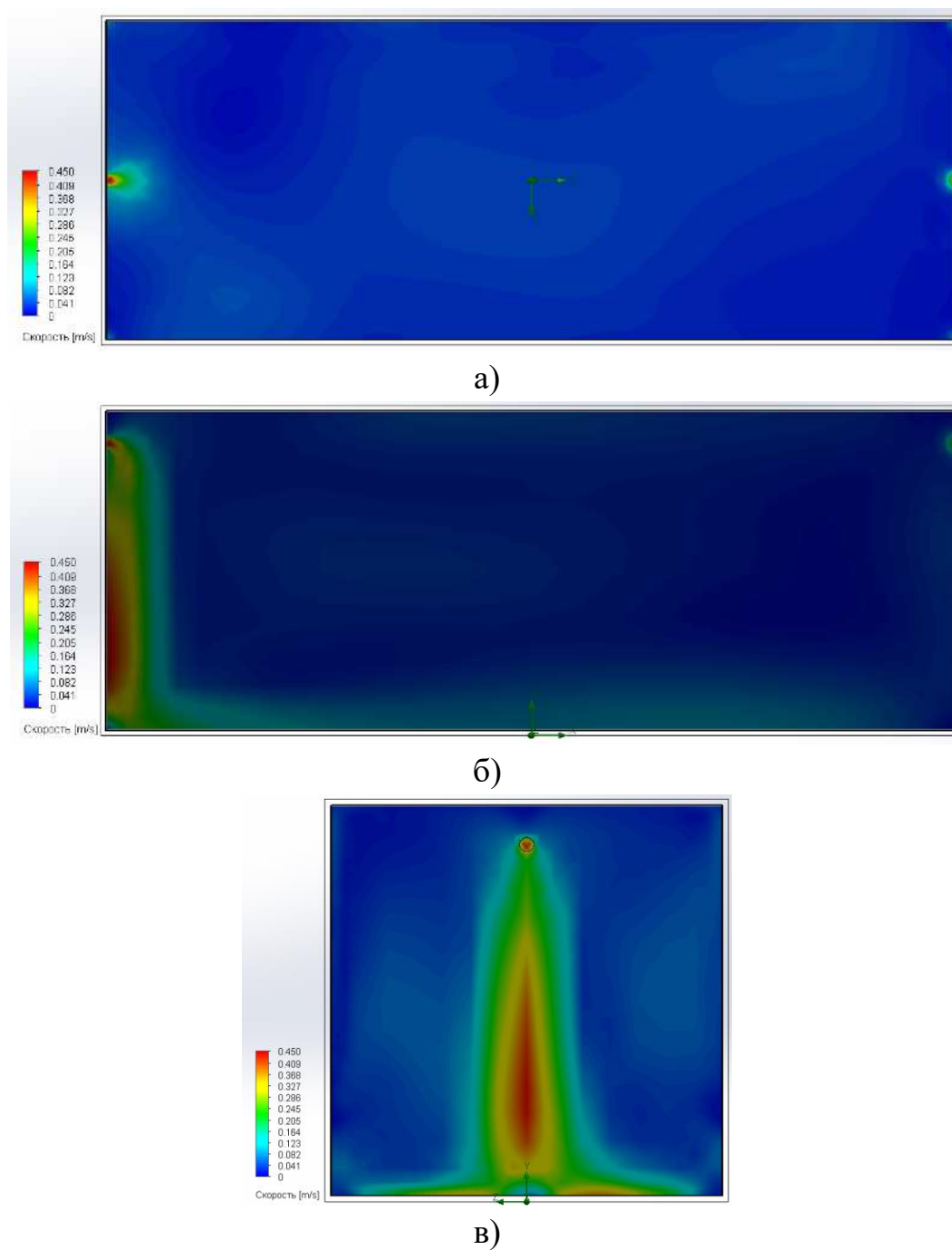


Рис. 2.19. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в холодний період року при витраті 15 м³/год: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від вхідного отвору

Температурні градієнти поступово зменшуються. Холодна зона біля підлоги стає менш вираженою, а змішування припливного та теплого внутрішнього повітря прискорюється (рис. 2.20).

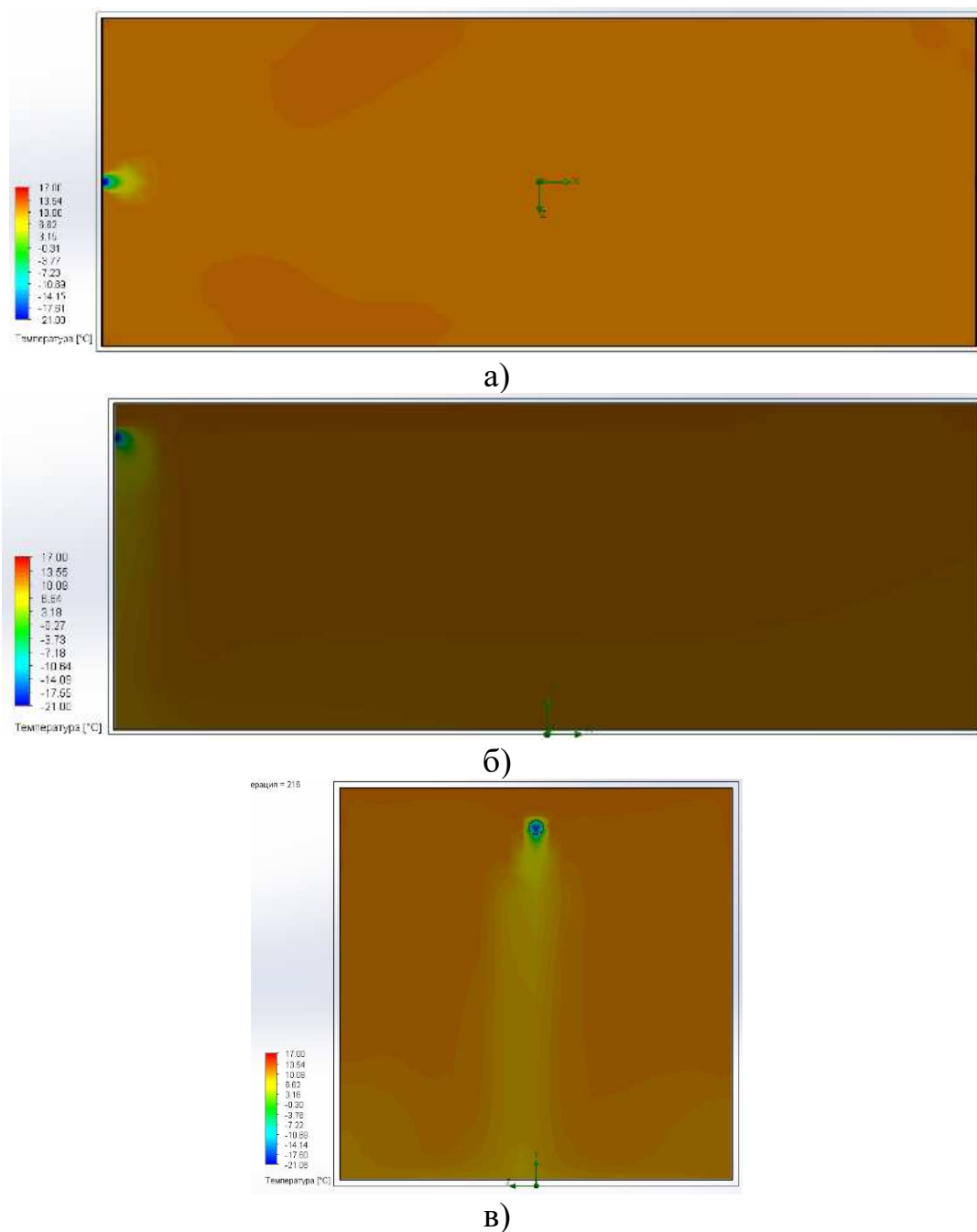


Рис. 2.20. Розподілення температури повітряного потоку в приміщенні в холодний період року при витраті $15 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від вхідного отвору

При витраті $20 \text{ м}^3/\text{год}$ потік стає ще інтенсивнішим, поступово втрачаючи чіткість, що сприяє більш активному перемішуванню. Повітря рівномірно розподіляється по об'єму приміщення, охолоджуючи шари більш ефективно (рис. 2.21).

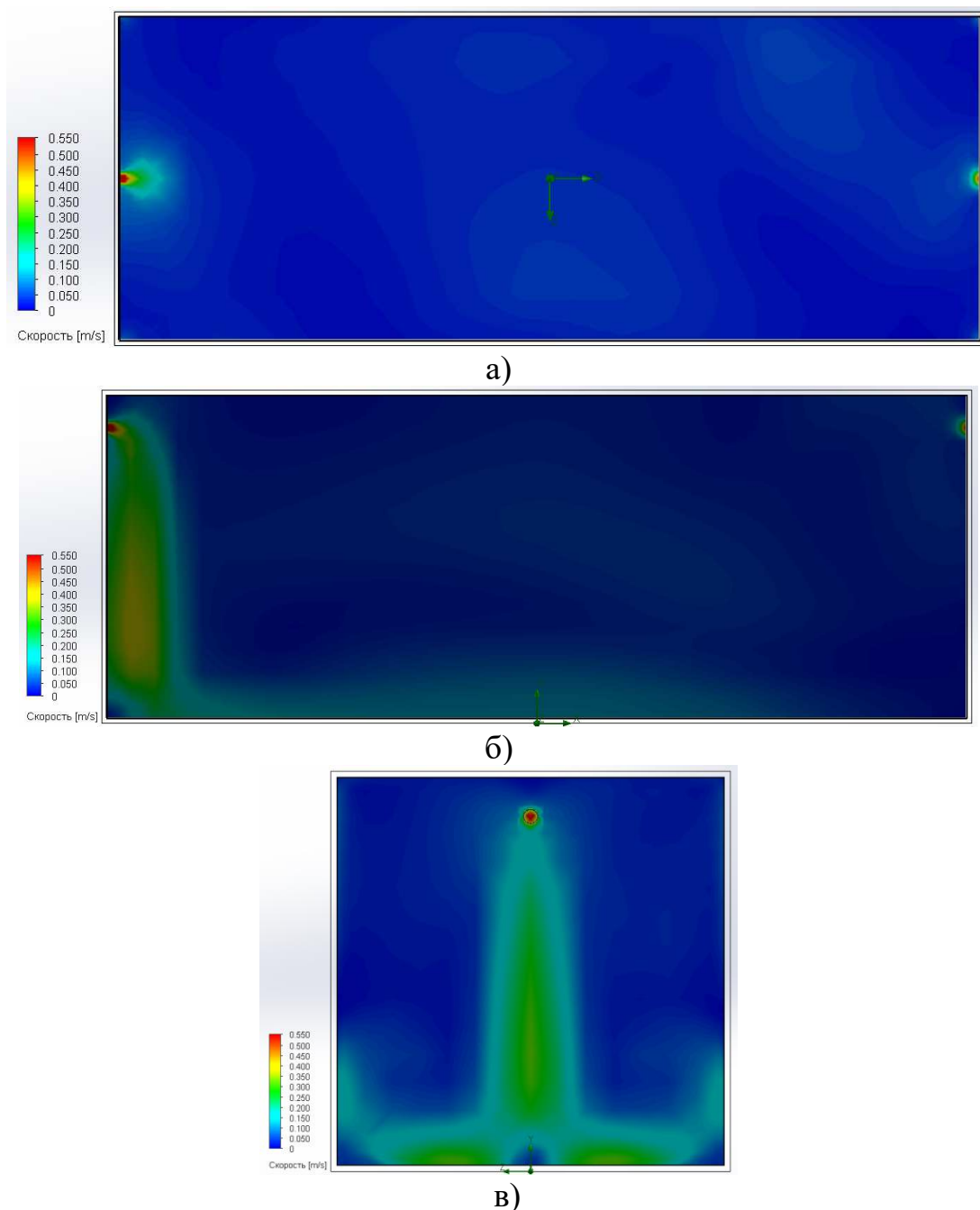


Рис. 2.21. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в холодний період року при витраті $20 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від вхідного отвору

Температурні поля показують, що локальні градієнти зменшуються, але холодне повітря все ще накопичується в нижній частині приміщення (рис. 2.22).

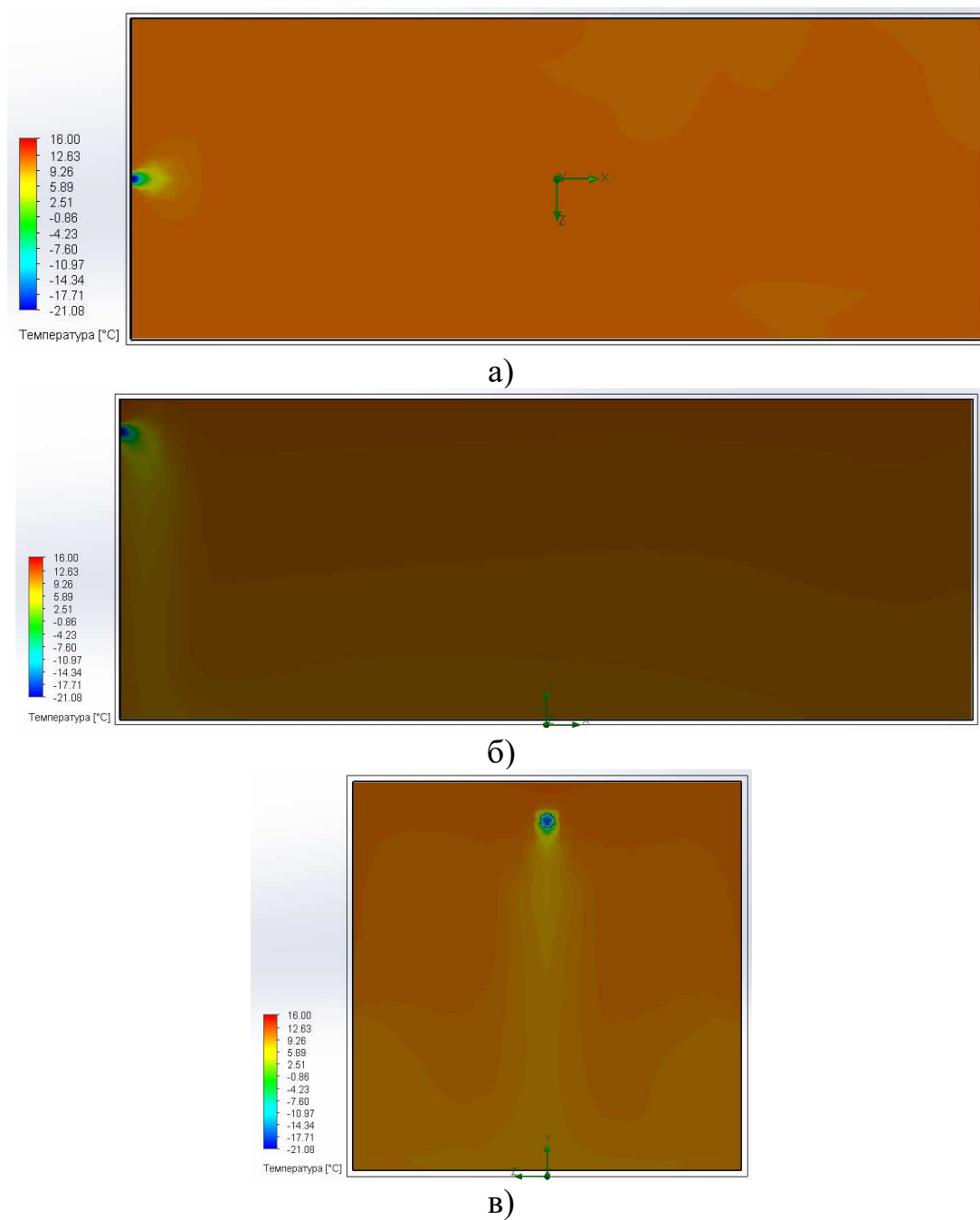


Рис. 2.22. Розподілення температури повітряного потоку в приміщенні в холодний період року при витраті $20 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від вхідного отвору

При витраті $40 \text{ м}^3/\text{год}$ потік охоплює більший об'єм приміщення. У нижніх шарах приміщення формуються зони помірної швидкості ($0,3 - 0,5 \text{ м/с}$), сприяючи рівномірному розподіленню повітря (рис. 2.23).

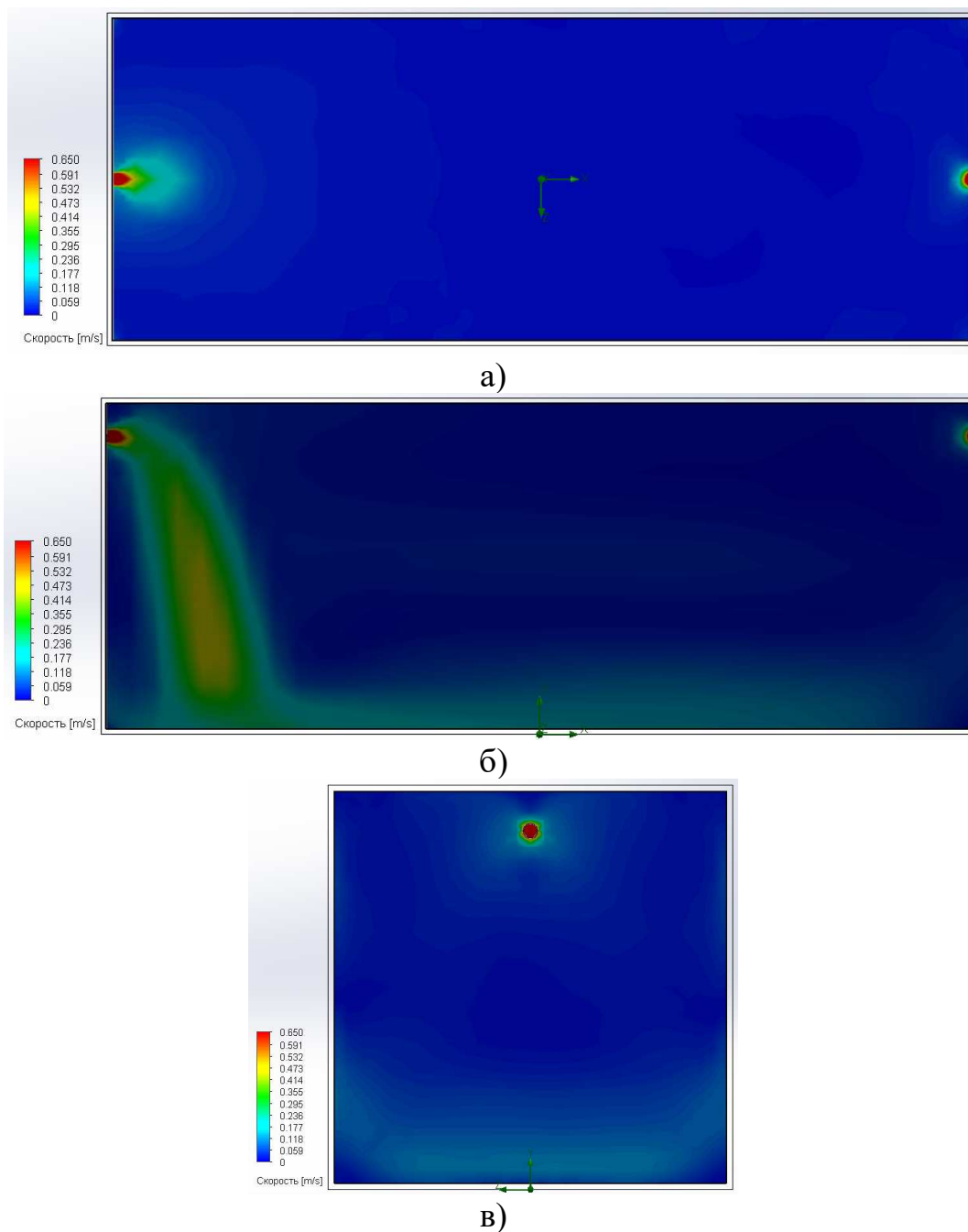


Рис. 2.23. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в холодний період року при витраті $40 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від вхідного отвору

Температура приміщення вирівнюється значно швидше. Холодне повітря більше не концентрується виключно в нижніх шарах, а рівномірно розподіляється по об'єму (рис. 2.24).

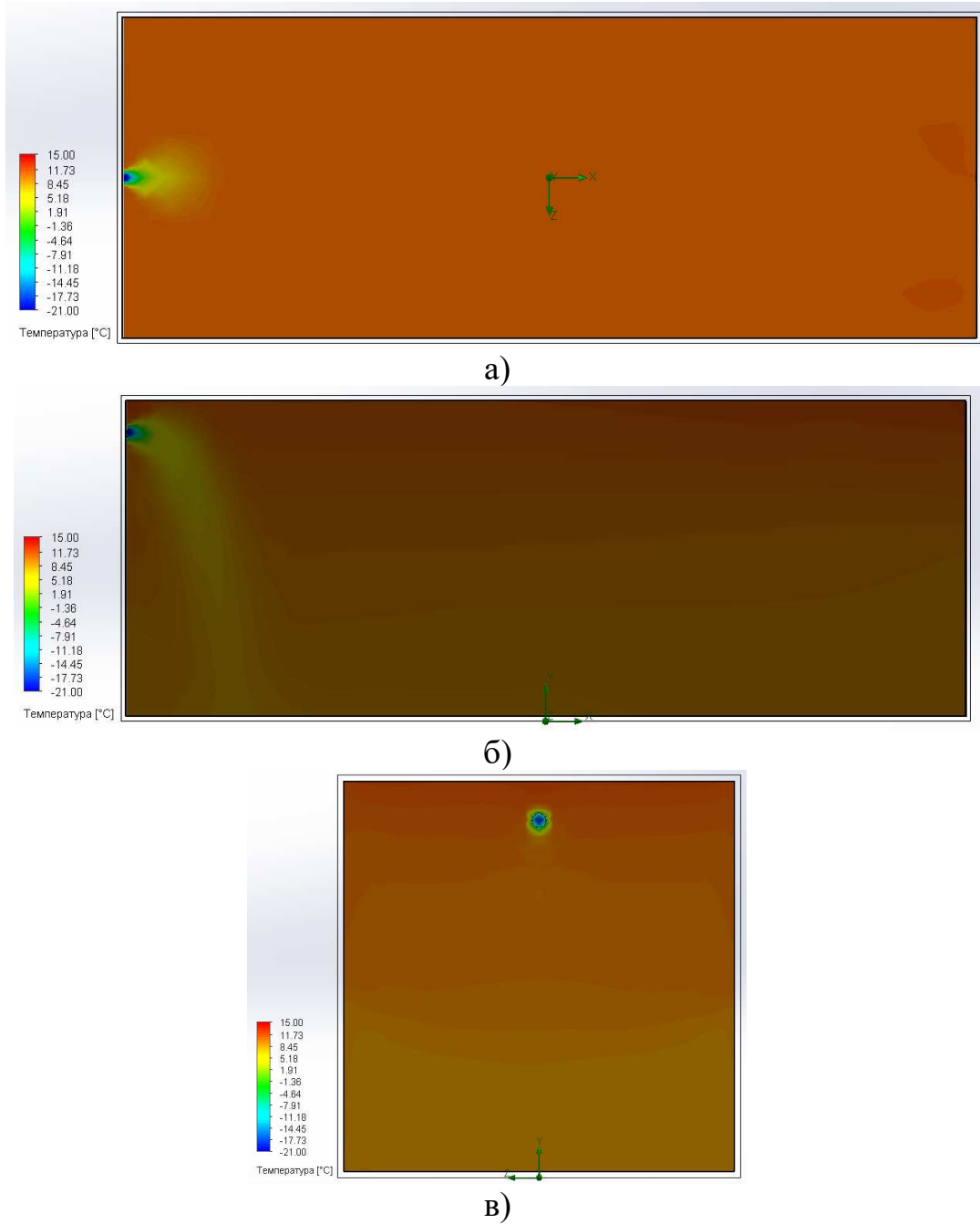


Рис. 2.24. Розподілення температури повітряного потоку в приміщенні в холодний період року при витраті $40 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від вхідного отвору

При витраті $60 \text{ м}^3/\text{год}$ потік зберігає високу інтенсивність і направленість, забезпечуючи активне перемішування повітря на всіх рівнях приміщення (рис. 2.25).

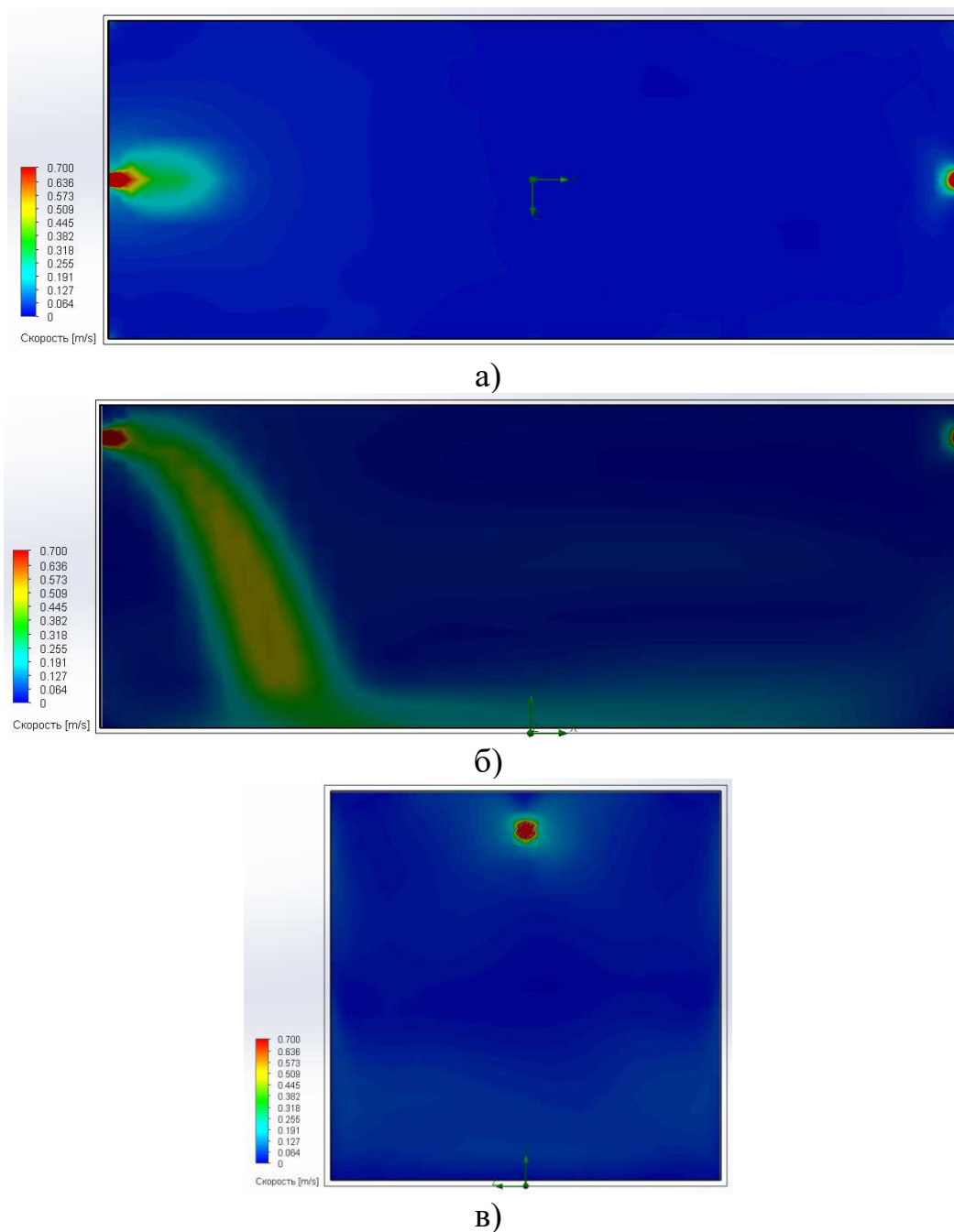


Рис. 2.25. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в холодний період року при витраті $60 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від вхідного отвору

Температурні градієнти вирівнюються швидше, а холодне припливне повітря активно змішується з теплим, що сприяє рівномірному охолодженню приміщення (рис. 2.26).

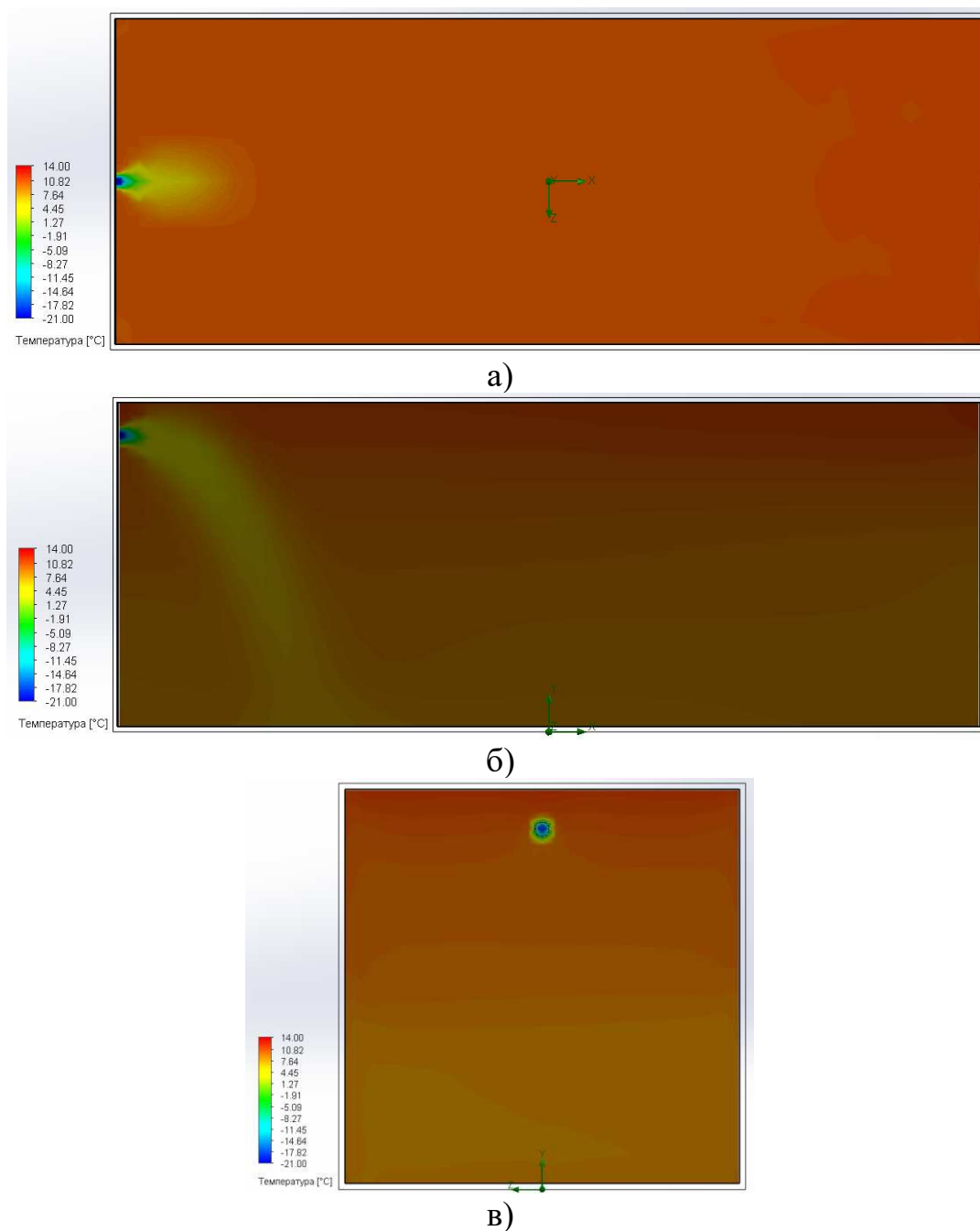


Рис. 2.26. Розподілення температури повітряного потоку в приміщенні в холодний період року при витраті $60 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від вхідного отвору

При витраті 80 м³/год потік стає ще більш рівномірним по всій висоті приміщення. Зони високої швидкості поширюються як у верхній, так і в нижній частинах (рис. 2.27).

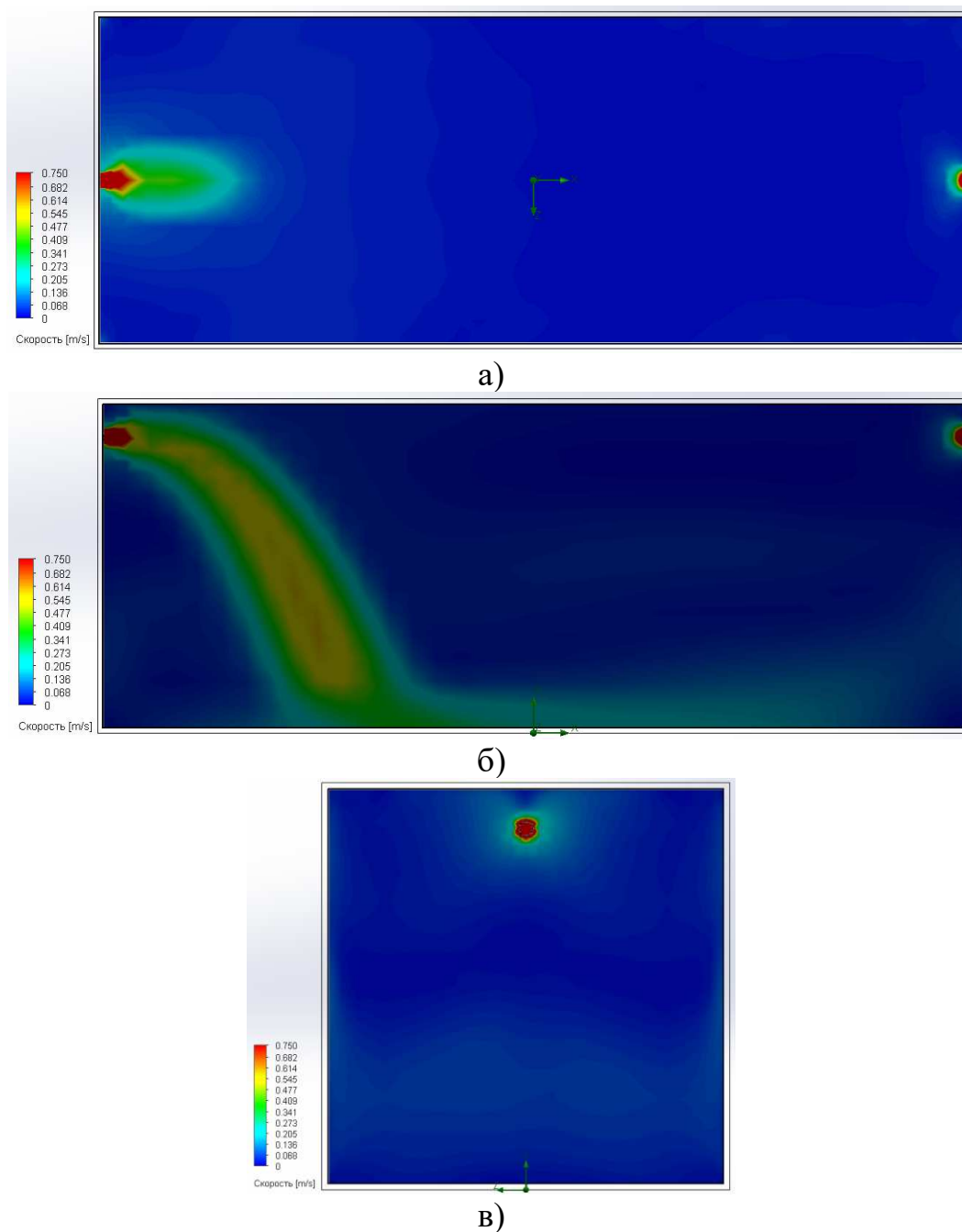


Рис. 2.27. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в холодний період року при витраті 80 м³/год: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від вхідного отвору

Температурне розподілення демонструє значне зменшення локальних градієнтів. Повітря в приміщенні швидко змішується, що усуває локальні холодні зони біля підлоги (рис. 2.28).

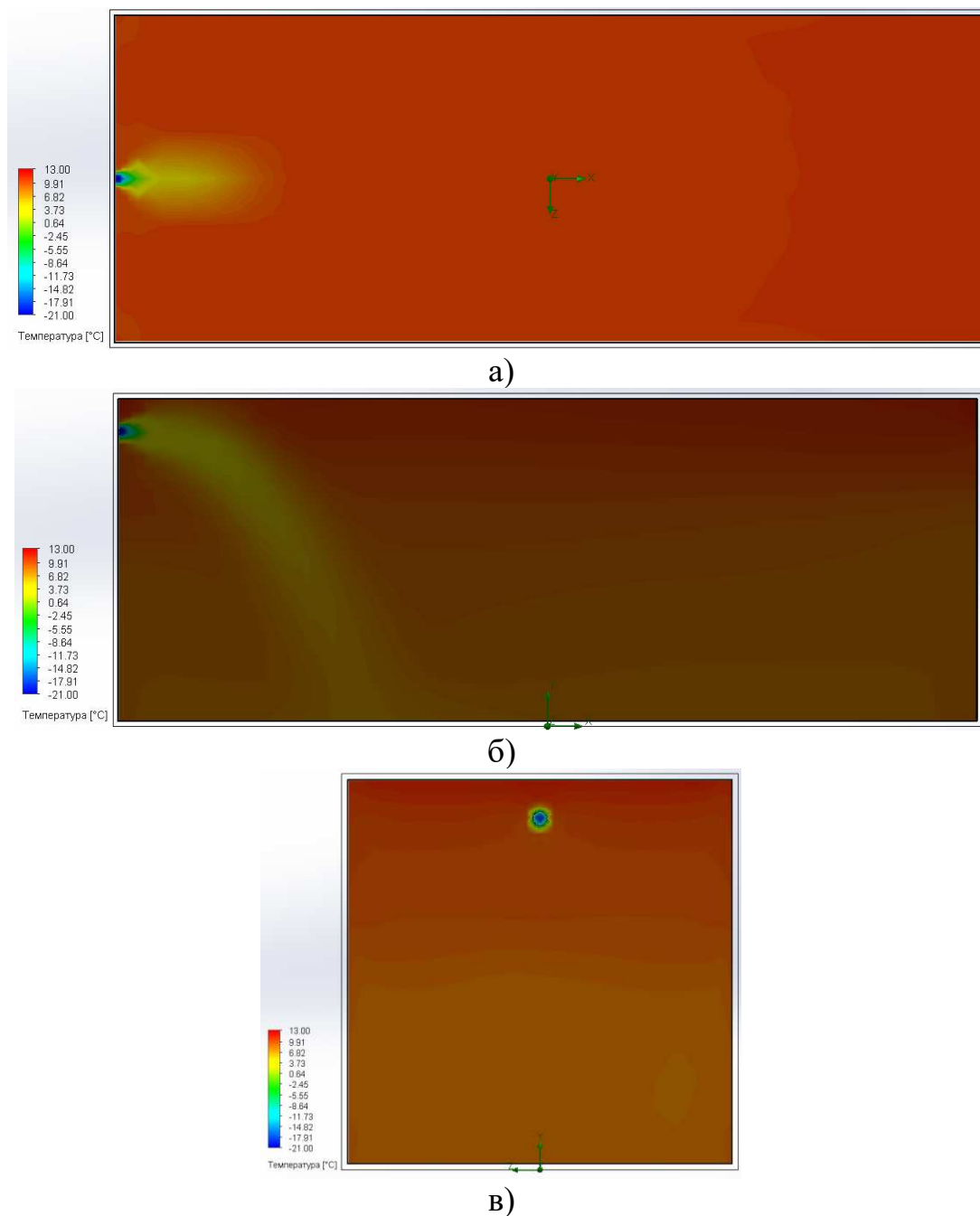


Рис. 2.28. Розподілення температури повітряного потоку в приміщенні в холодний період року при витраті $80 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від вхідного отвору

При витраті $100 \text{ м}^3/\text{год}$ потік досягає високої швидкості (до 3 м/с), створюючи турбулентні потоки, які активно перемішують все повітря в приміщенні (рис. 2.29).

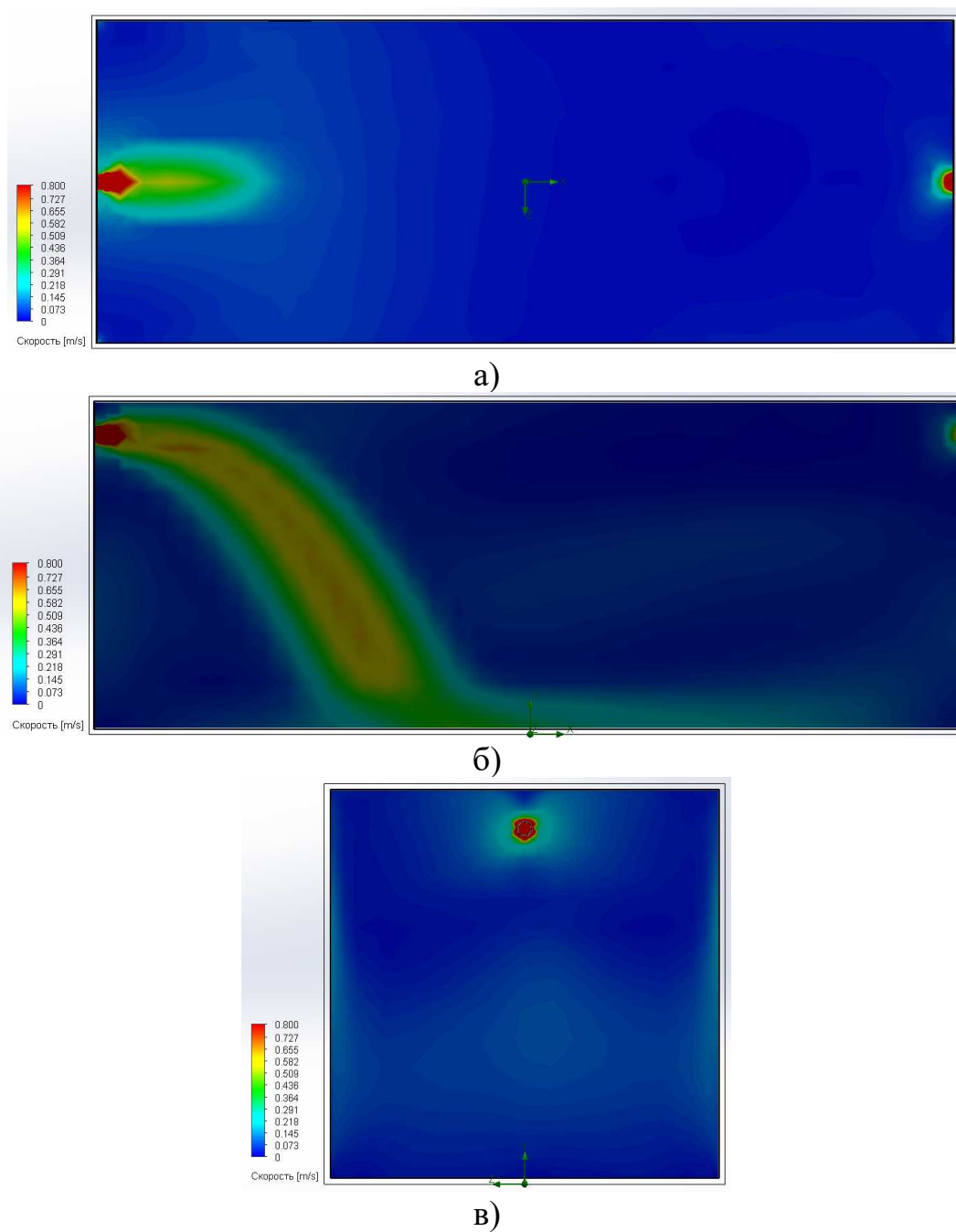


Рис. 2.29. Розподілення швидкості повітряного потоку в приміщенні в холодний період року при витраті $100 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від вхідного отвору

Температурні поля демонструють формування значної зони охолодженого повітря в центральній частині приміщення. Однак через інтенсивність потоку холодне повітря залишається домінуючим. Нагрівання відбувається лише на віддаленні від припливного отвору, що створює помітні температурні градієнти між верхньою та нижньою частинами приміщення.

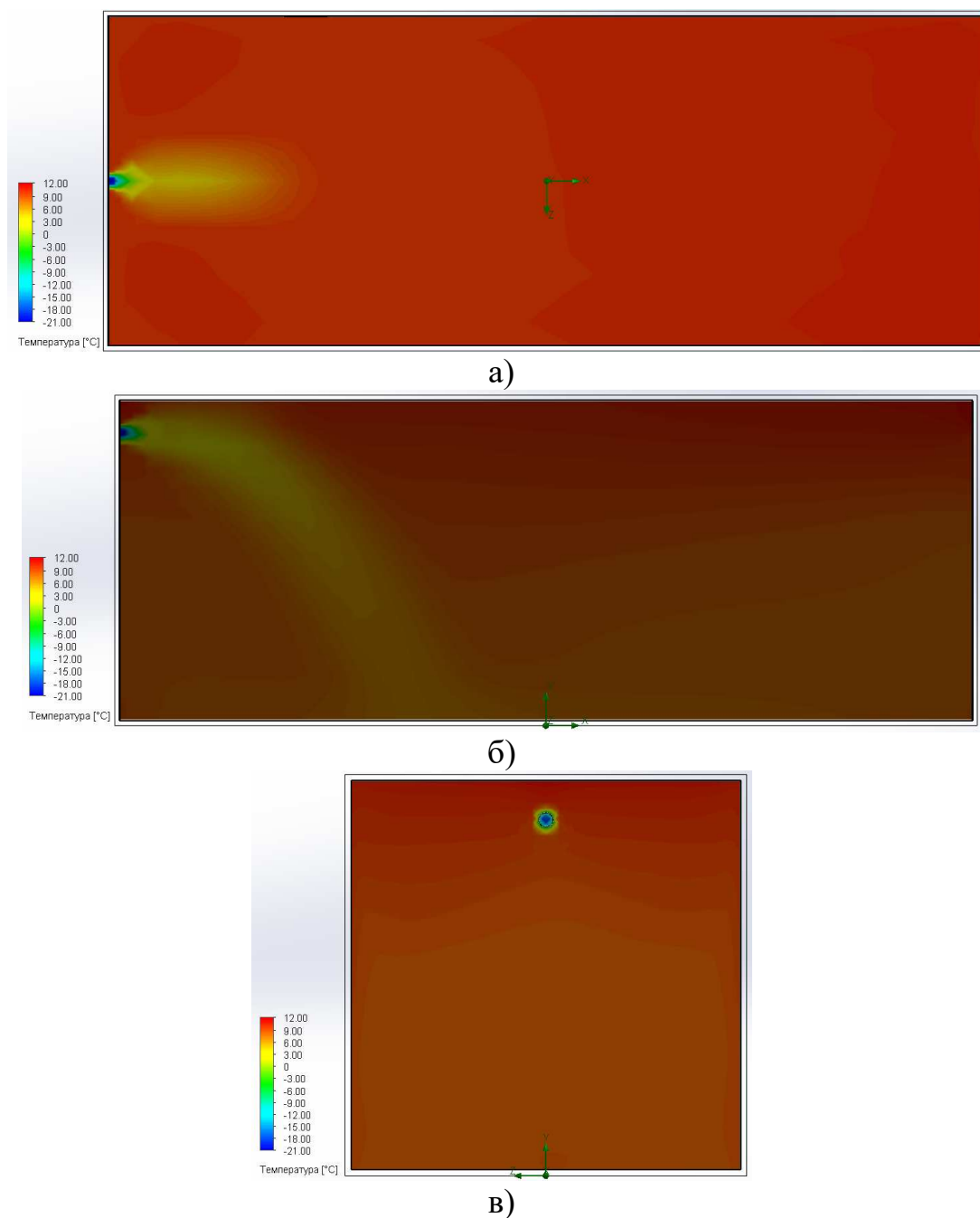


Рис. 2.30. Розподілення температури повітряного потоку в приміщенні в холодний період року при витраті $100 \text{ м}^3/\text{год}$: а – у фронтальній площині; б – у

горизонтальній площині; в – у фронтальній площині на відстані 5 мм від вхідного отвору

2.4. Висновки до розділу 2

Розділ 2 містить результати теоретичних досліджень, моделювання та аналізу функціонування пасивних систем вентиляції з використанням вітровловлювача. У процесі дослідження було встановлено ключові характеристики запропонованої конструкції вітровловлювача, а також оцінено її ефективність у забезпеченні природного повітрообміну та енергоощадності будівель.

Розроблена фізична модель вітровловлювача продемонструвала потенціал інтеграції цього елемента в сучасні та реконструйовані системи вентиляції. Завдяки унікальній конструкції, вітровловлювач забезпечує стабільний забір зовнішнього повітря незалежно від швидкості чи напрямку вітру. Інноваційні технічні рішення, що лежать в основі його роботи, сприяють мінімізації зворотних втрат повітря через механізм жалюзі (заслінок), які функціонують як пасивний зворотний клапан, оптимізуючи повітряний потік у системі.

Прототип вітровловлювача поєднує енергоефективність із екологічністю, базуючись на принципі використання природної сили вітру для забезпечення стабільного повітрообміну. Це рішення дозволяє значно скоротити залежність від механічних вентиляційних систем, знижуючи загальне енергоспоживання будівлі. Постійний і рівномірний приплив свіжого повітря забезпечує комфортний мікроклімат, сприяючи ефективному видаленню надлишкової вологи, вуглекислого газу та інших забруднень. Універсальність конструкції вітровловлювача дозволяє легко інтегрувати його в будівлі будь-якого типу, включаючи новобудови та модернізовані споруди. Його можна встановлювати на різних частинах будівлі, таких як дахи чи фасади, що робить його ідеальним рішенням для сталого будівництва, орієнтованого на енергоефективність та екологічність.

Визначення гідродинамічних характеристик вітровловлювача показало, що запропонована конструкція забезпечує ефективну взаємодію з повітряним потоком. За допомогою моделювання в програмі Solidworks Flow Simulation було отримано дані про розподілення швидкості, тиску та вихрові структури залежно від кутів атаки повітряного потоку та його швидкості. Дослідження показали, що при низьких швидкостях повітряний потік плавно огинає конструкцію вітровловлювача, а зі зростанням швидкості виникають зони низького тиску, які сприяють формуванню вихорів. Такий підхід підвищує кінетичну енергію повітря та сприяє кращій аерації приміщень.

Комп'ютерне моделювання пасивної системи вентиляції енергоощадного будинку дало змогу оцінити вплив різних умов роботи вітровловлювача на мікроклімат приміщення. Було проведено аналіз ефективності системи для теплого та холодного періодів року. Результати показали, що при мінімальній витраті повітря забезпечується рівномірний і стабільний розподіл повітряного потоку, що підходить для підтримання комфортного мікроклімату в умовах низької потреби в вентиляції. Зі збільшенням витрат повітря досягнуто більш ефективного повітрообміну, який дозволяє забезпечити глибоке проникнення потоку в приміщення навіть при складних кліматичних умовах.

Загалом, результати моделювання та аналізу підтвердили, що запропонована конструкція вітровловлювача є ефективним рішенням для інтеграції в пасивні системи вентиляції. Вона забезпечує енергозбереження, екологічність і підтримку комфортного мікроклімату, що особливо актуально для сучасного будівництва та реконструкції будівель. Висновки дослідження відкривають перспективи подальшої оптимізації та широкого впровадження запропонованої конструкції в системи вентиляції енергоощадних будинків.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІТРОВЛОВЛЮВАЧА ПАСИВНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ

3.1. Методика проведення експерименту. Опис експериментальної установки

3.1.1. Схема експериментальної установки

Дослідження кількості вловленого вітровловлювачем повітря проводилося на експериментальній установці, схему якої показано на рис. 3.1.

Для проведення лабораторних досліджень було змонтовано вітровловлювач з геометричними розмірами $(a \times b \times h)$ $0,2 \times 0,335 \times 0,3$ м (рис. 2.1). Оскільки запропонований вітровловлювач можна розташувати на даху та під'єднати до природної системи вентиляції, тому в процесі проведення експерименту кут набігаючого потоку повітря відносно вертикальної осі вітровловлювача змінювався від 0 градусів до 45 градусів (рис. 3.2). Для зручності проведення експерименту в просторі навколо вітровловлювача по ширині, довжині та висоті було розбито координатну сітку з квадратами 10×10 см. Швидкість набігаючого на вітровловлювач повітря змінювалася за допомогою регулювання потужності вентилятора в межах від 0,4 м/с до 6,0 м/с.

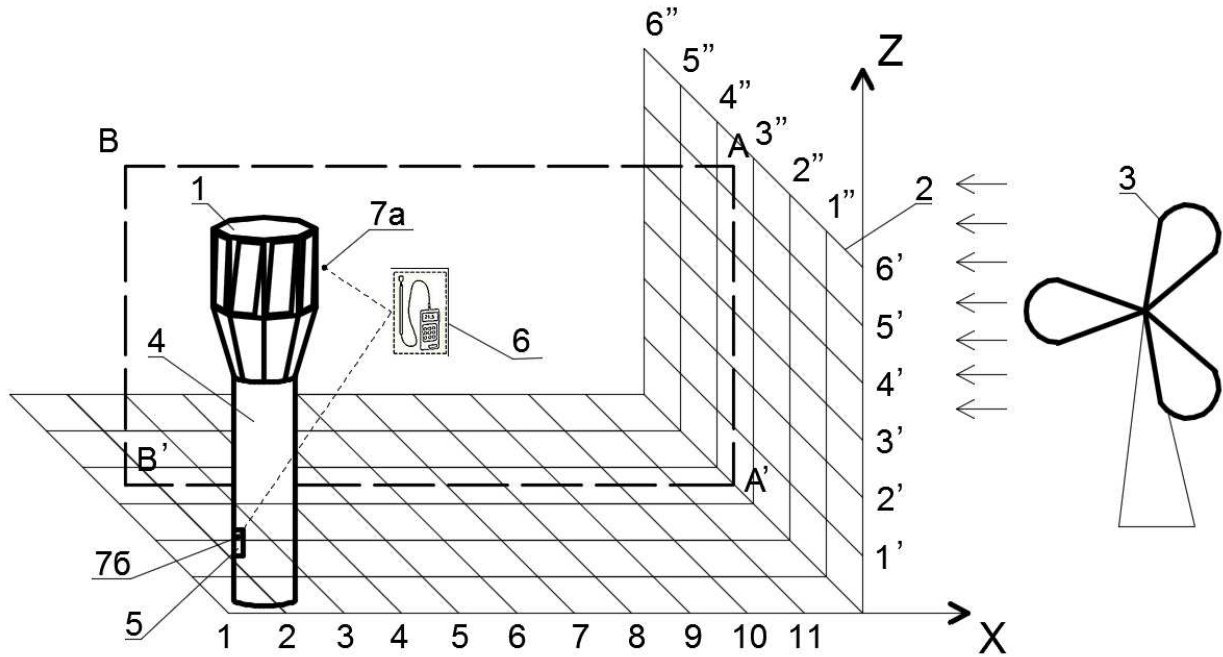


Рис. 3.1. Схема експериментальної установки для дослідження кількості вловленого вітровловлювачем повітря: 1 – вітровловлювач; 2 – координатна сітка; 3 – нагнітач повітря; 4 – повітропровід; 5 – вікно для зняття показників; 6 – термоанемометр АТТ-1004; 7а, 7б – місця зняття показників АВА'В' - характерний серединний переріз в дослідній установці

За допомогою термоанемометра АТТ-1004 замірялися швидкості повітря в точці перед вітровловлювачем і вловленого повітря у вікні для зняття показників.

Корпус вітровловлювача в прототипі було виготовлено з дерев'яної панелі, а жалюзі (заслінки) та напрямні ребра було виготовлено з щільного паперу, задля запобігання деформації при великих швидкостях набігаючого потоку повітря. Матеріали обиралися через їхню доступність, простоту при виготовленні та стійкість до деформації. Рухомі жалюзі (заслінки) та напрямні ребра під час проведення дослідів не мали спільних точок дотику.

3.1.2. Порядок проведення експерименту

Досліди на експериментальному вітровловлювачі (рис. 2.1) проводилися в лабораторному корпусі Криворізького національного університету, м. Кривий Ріг, Україна.

Для отримання більш достовірних результатів було змодельовано розвинений повітряний потік із мінімальною різницею швидкості повітря від центру до краю. Вітровловлювач було під'єднано до вентиляційної труби, яка мала можливість обертатися разом із вітровловлювачем навколо своєї осі, для керування кута набігаючого потоку повітря на вітровловлювач.

Рівномірність і стабільність швидкості повітря були достатні для проведення експериментальних вимірювань і перевірки результатів.

Експеримент проводився за такою методикою:

1. Умикався нагнітач повітря (вентилятор).
2. За допомогою термоанемометра вимірювалася швидкість набігаючого повітряного потоку в точці перед вітровловлювачем.
3. За допомогою термоанемометра вимірювалася швидкість вловленого вітровловлювачем повітря у вікні для зняття показників.
4. Змінювався кут набігаючого повітряного потоку (рис. 4) і повторювалися дії 2 та 3 пунктів.
5. Змінювалася швидкість набігаючого повітряного потоку й повторювалися дії пунктів з 2 по 4.

Для вимірювання швидкості руху потоку повітря використовувався термоанемометр АТТ–1004 з можливістю вимірювання швидкості повітряного потоку в діапазоні від 0,2 до 20,0 м/с та похибкою $\pm(0,2+0,05V)$ м/с, де V – швидкість повітряного потоку, м/с.

Після проведення дослідів витрата вловленого вітровловлювачем повітря визначалася за формулою:

$$L = 3600 \cdot V \cdot F = 3600 \cdot V \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \text{ м}^3/\text{Год},$$

де V – швидкість повітря в повітропроводі, м/с;

F – площа живого перетину повітропроводу, м²;

d – діаметр повітропроводу, м².

За даними багаторічних спостережень у м. Кривий Ріг, переважають вітри північного й північно-східного напрямів, багато випадків вітру східного та північно-західного напрямків. У холодну частину року переважають вітри північно-східного й східного напрямків, у теплу – північного й північно-західного. Повторюваність напрямків вітру і штилів (%) наведено в табл. 3.1 [170].

Таблиця 3.1

Повторюваність напрямків вітру та штилів (%)

Напрями вітру	Пн	ПнС	С	ПдС	Пд	ПдЗ	З	ПнЗ	Штиль
Повторюваності вітру, %	15,4	16,1	15,2	10,3	9,8	10,3	11,5	11,4	10,5

Середня річна швидкість вітру в м. Кривий Ріг дорівнює 5 м/с. Найбільші швидкості спостерігаються взимку й навесні, найменші – улітку й на початку осені.

Середньомісячні й річна швидкості вітру (м/с) у м. Кривий Ріг наведено в табл. 3.2 [170].

Таблиця 3.2

Середньомісячні й річна швидкості вітру (м/с) у м. Кривий Ріг

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Рік
5,6	5,9	5,8	5,3	5,0	4,4	4,1	4,1	4,2	4,6	5,2	5,6	5,0

Досліди проводилися з різними швидкостями та кутами набігаючого повітряного потоку. Швидкість повітряного потоку коливалася в діапазоні від 0,4 до 6 м/с, кут повітряного потоку коливав в діапазоні від 0 до 45 градусів (рис. 3.2).

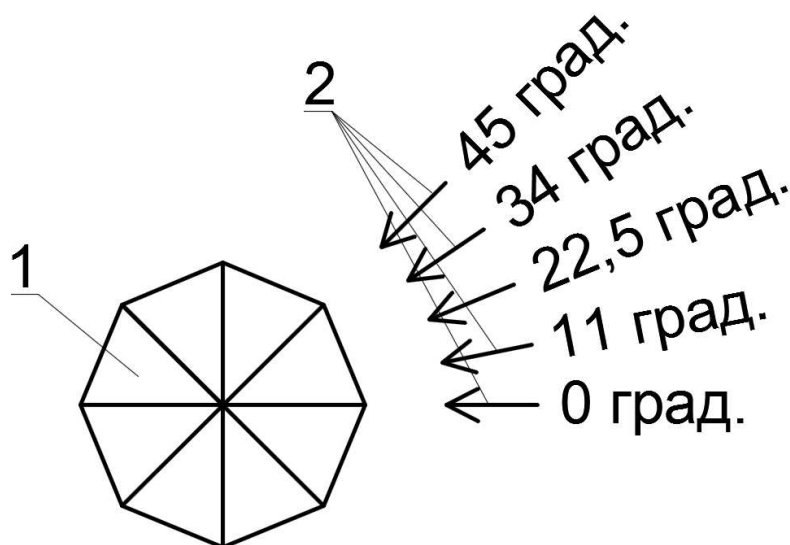


Рис. 3.2. Значення кутів набігаючого потоку повітря на вітровловлювач (вид згори): 1 – вітровловлювач; 2 – кути набігаючого потоку повітря

При проведенні другого етапу дослідження було отримано профілі швидкості повітря шляхом вимірювання швидкості вітру в 24 точках на різних відстанях перед вітровловлювачем при різних швидкостях і кутах набігаючого потоку повітря. Середня швидкість потоку повітря під час експерименту змінювалася з 0,4 до 6 м/с. Профілі швидкості повітря в різних експериментах були виміряні для перевірки симуляції. Експеримент проводився за такою ж методикою.

Точки зняття показників швидкості повітря (рис. 3.3) розміщені у вертикальній площині вздовж вертикальної та горизонтальної осей корпусу вітровловлювача. Точки, які знаходяться в площині корпусу вітровловлювача по горизонталі та по вертикалі, розміщені на відстані 5 см одна від одної, інші точки по вертикалі розміщені на відстані 10 см.

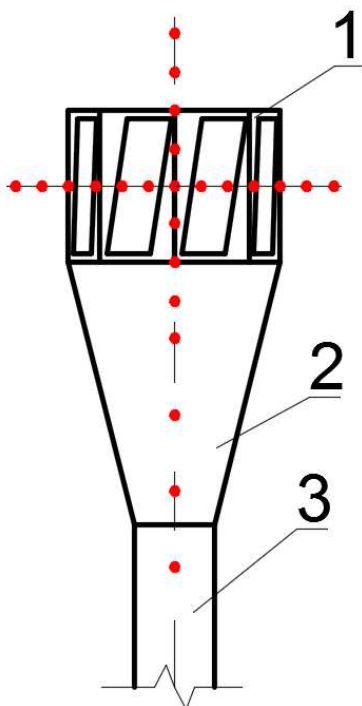


Рис. 3.3. Точки вимірювання швидкості потоку повітря: 1 – корпус вітровловлювача; 2 – конфузор; 3 – вентиляційний канал

**Примітка: вплив зміни висоти розміщення вітровловлювача, тиску, температури та вологості повітря на витрату вловленого вітровловлювачем повітря не досліджувався*

3.2. Результати експериментальних досліджень

Дослідження проводилися на експериментальній установці (рис. 3.2). На першому етапі дослідження визначалася витрата вловленого вітровловлювачем повітря при різних швидкостях і кутах набігаючого потоку повітря. Результати експериментальних досліджень наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Результати експериментальних досліджень

$\alpha = 11$		$\alpha = 0$		Кут набігаючого потоку
Витрата вловленого	Швидкість вловленого	Витрата вловленого	Швидкість вловленого	
184,65	5,40	188,76	5,52	5,84
130,63	3,82	140,54	4,11	4,46-4,41
127,21	3,72	136,10	3,98	4,15-4,17
122,42	3,58	125,15	3,66	3,84-3,88
99,17	2,90	102,93	3,01	3,22
79,33	2,32	92,33	2,70	3,01-2,93
66,68	1,95	69,76	2,04	2,33
44,80	1,31	46,16	1,35	2,09-1,99
41,72	1,22	44,80	1,31	1,89-1,83
40,35	1,18	43,77	1,28	1,75-1,73
28,72	0,84	31,46	0,92	1,13-1,07
25,30	0,74	25,65	0,75	0,90-0,86
24,28	0,71	24,96	0,73	0,85-0,78
19,49	0,57	20,52	0,60	0,70-0,63
16,07	0,47	17,10	0,50	0,54-0,50
11,28	0,33	11,97	0,35	0,50-0,46

$\alpha = 45$		$\alpha = 34$		$\alpha = 22,5$	
Витрата вловленого	Швидкість вловленого	Витрата вловленого	Швидкість вловленого	Витрата вловленого	Швидкість вловленого
188,76	5,52	186,02	5,44	183,63	5,37
140,54	4,11	132,68	3,88	124,47	3,64
136,10	3,98	128,23	3,75	122,42	3,58
125,15	3,66	123,79	3,62	117,29	3,43
102,93	3,01	100,53	2,94	97,11	2,84
92,33	2,70	81,38	2,38	79,67	2,33
69,76	2,04	67,71	1,98	65,31	1,91
46,16	1,35	45,14	1,32	43,77	1,28
44,80	1,31	42,74	1,25	40,69	1,19
43,77	1,28	41,38	1,21	38,98	1,14
31,46	0,92	29,07	0,85	27,36	0,80
25,65	0,75	25,30	0,74	24,62	0,72
24,96	0,73	24,28	0,71	23,60	0,69
20,52	0,60	19,49	0,57	19,15	0,56
17,10	0,50	16,41	0,48	15,39	0,45
11,97	0,35	11,63	0,34	10,26	0,30

За результатами експериментальних досліджень було побудовано графічну залежність витрати вловленого вітровловлювачем повітря L , м³/год, від швидкості набігаючого потоку повітря V , м/с, при різних кутах набігаючого потоку α (рис. 3.4).

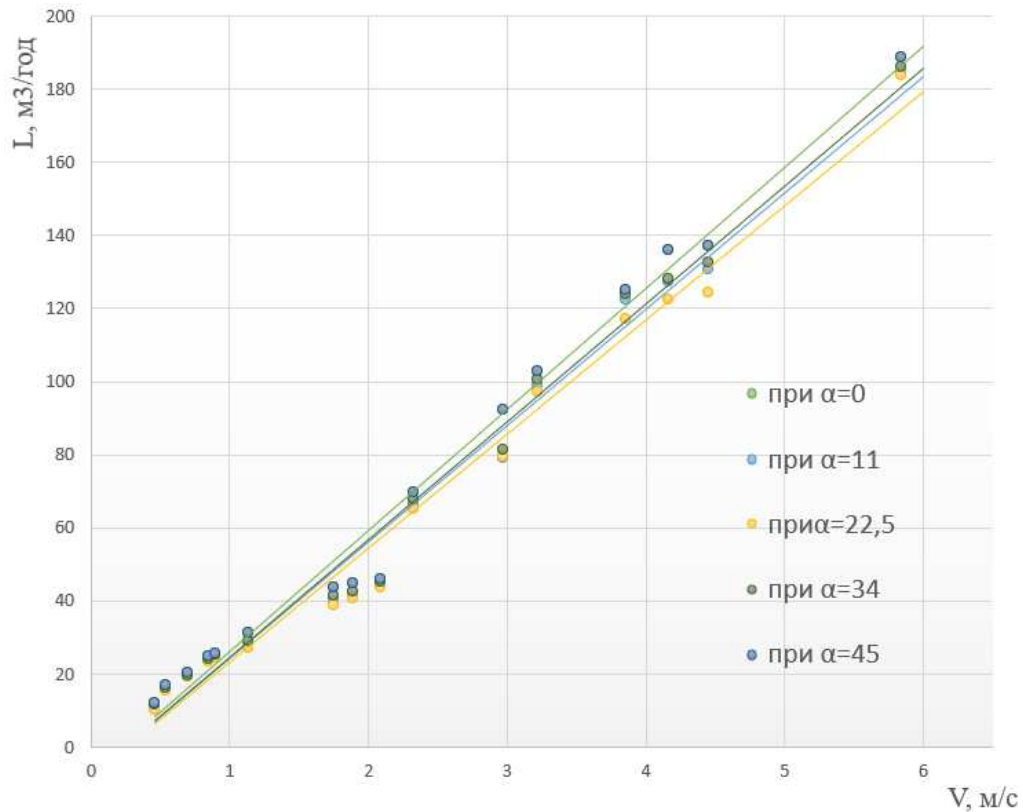


Рис. 3.4. Залежність витрати вловленого вітровловлювачем повітря L , м³/год, від швидкості набігаючого потоку повітря V , м/с при різних кутах набігаючого потоку α ; «•» – експериментальні дані; «—» – розрахункові дані

Ці дані графічні залежності були апроксимовано та отримано рівняння для різних кутів набігаючого потоку повітря α :

для $\alpha = 0$ градусів: $y = 33,065x - 6,8422$;

для $\alpha = 11$ градусів: $y = 31,856x - 7,5649$;

для $\alpha = 22,5$ градуса: $y = 31,186x - 7,7814$;

для $\alpha = 34$ градуси: $y = 32,185x - 7,4742$;

для $\alpha = 45$ градусів: $y = 33,065x - 6,8422$.

Завдяки залежності, отриманій на основі лабораторних досліджень, можна визначити витрату вловленого вітровловлювачем повітря з урахуванням швидкості та кута набігаючого потоку повітря. Слід зазначити, що найбільший вплив на величину витрати вловленого вітровловлювачем повітря L , м³/год має швидкість набігаючого повітря V , м/с.

За отриманими результатами було розраховано ККД вітровловлювача, в залежності від кута набігаючого потоку повітря протягом року (рис. 3.5) за формулою:

$$\eta = \frac{V_{\text{в/в}}}{\Delta V_{\text{міс}}} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

де $\Delta V_{\text{міс}}$ – середньомісячна швидкість повітря в м. Кривий Ріг, м/с (табл. 3.2);

$V_{\text{в/в}}$ – швидкість уловленого вітровловлювачем повітря за результатами експериментальних досліджень, м/с (табл. 3.3).

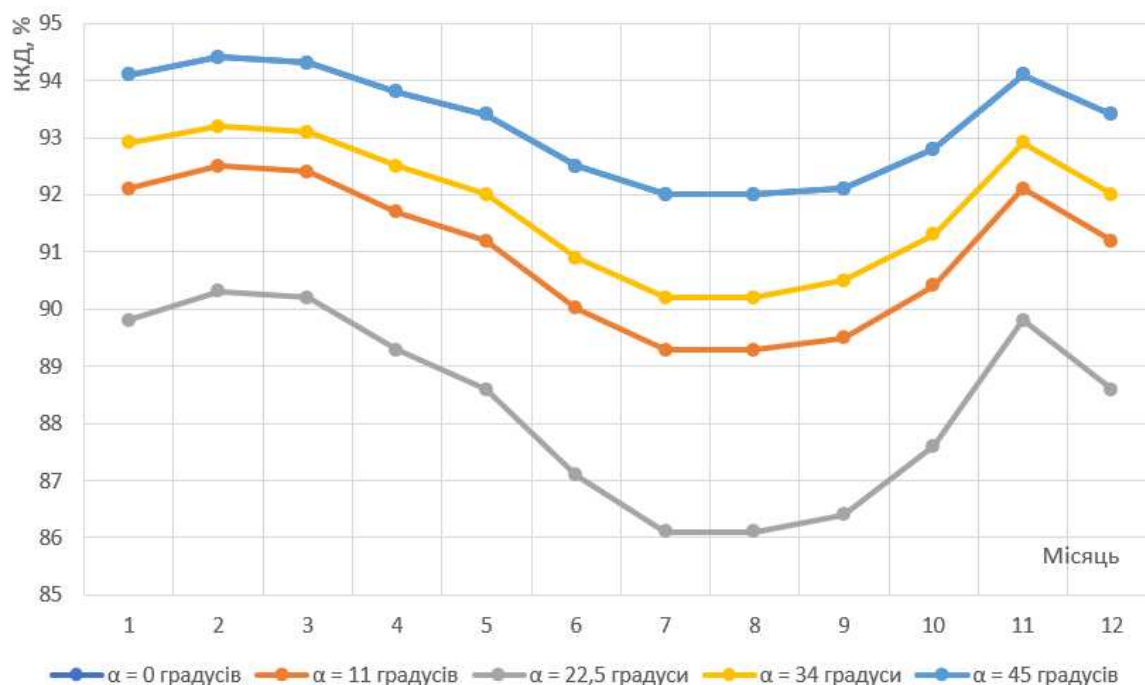


Рис. 3.5. Графік залежності ККД вітровловлювача від кута набігаючого потоку повітря протягом року

Максимальний середній ККД вітровловлювача становить 94,4% при куті набігаючого повітряного потоку 0 градусів і 45 градусів, а мінімальний – 86,1%, при куті набігаючого повітряного потоку 22,5 градуса.

3.3. Обробка результатів експериментальних досліджень

Для визначення ступеню впливу кожного з цих параметрів складалася план-матриця експерименту з рекомендаціями Адлера, Калоша, Барабашука [171-173]. Перше із значень кожного чинника відповідало його мінімальному значенню і позначалося «-1», друге – максимальному й позначалося «+1» (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Чинники та рівні планування

Чинники	Кодове позначення чинника	Рівні факторів		Інтервал між основним та верхнім рівнями чинника
		-1	+1	
Швидкість набігаючого потоку повітря V_n , м ³ /год	x_1	0,46	5,84	5,38
Кут набігаючого потоку повітря α , °град	x_2	0	45	22,5

Необхідна кількість дослідів визначалася за формулою:

$$N = p^k, \quad (3.2)$$

де p – кількість рівнів чинників експерименту ($p=2$);

k – кількість чинників ($k = 2$).

Отже, кількість дослідів дорівнює: $N = 2^2 = 4$.

Для визначення впливу вказаних чинників проводився повний факторний експеримент, що складався з чотирьох дослідів [174]. Нижче подано план-матрицю двофакторного експерименту (табл. 3.5).

Таблиця 3.5

План-матриця повного факторного експерименту 2^k при $k = 2$

№ дослідів п/п	Визначальні чинники		Функція відгуку
	$x_1 (V)$	$x_2 (\alpha)$	
1	2	3	5
1.	-	-	y_1
2.	+	-	y_2
3.	-	+	y_3
4.	+	+	y_4

Функція відгуку є витрата повітря, уловленого вітровловлювачем, L , $\text{м}^3/\text{год}$. Для кожного з дослідів витрата повітря визначалась як середнє арифметичне від суми місцевих значень [175]:

$$L = \frac{1}{K} \sum_{l=1}^K L_l, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (3.3)$$

де K – число певних місцевих значень витрати повітря L ;

l – порядковий номер місцевого значення витрати повітря.

Результати факторного експерименту процесу описувалися математичною моделлю полінома. Рівняння регресії має такий вигляд:

$$y = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2, \quad (3.4)$$

де $b_0, \dots, b_{12}$ – коефіцієнти рівняння регресії, що обчислювалися за формулою:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji} \overline{y_i}, j = 0, 1, \dots, k. \quad (3.5)$$

де j – номер чинника;

x_{ji} – кодоване значення чинника в дослідженні;

$\overline{y_i}$ – середнє значення змінної стану за n паралельними дослідями i -го рядка, тобто за трьома паралельними дослідями:

$$\overline{y_i} = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_{iu}, \quad (3.6)$$

де u – поточний номер паралельного дослідів з N вимірювань;

n – кількість паралельних дослідів, які проводилися при однакових умовах.

Матриця планування, результати досліджень та їхня обробка наведені в табл.

3.5.

Таблиця 3.5

Матриця планування й результати розрахунку експериментального дослідження

№	План				Змінна стану			$\bar{y}$	s_i^2
	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	y_1	y_2	y_3		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	+	+	+	+	5,53	5,51	5,52	5,52	0.0003
2	+	-	+	-	3,03	3,00	3,01	3,01	0.00025
3	+	+	-	-	2,06	2,03	2,03	2,04	0.0003
4	+	-	-	+	0,94	0,91	0,91	0,92	0.0003

Коефіцієнти рівняння регресії визначалися за формулою (3.5):

$$b_0 = \frac{\sum \bar{y}_1}{N} = \frac{5.52 + 3.01 + 2.04 + 0.92}{4} = 2.87;$$

$$b_1 = \frac{\sum \bar{y}_2}{N} = \frac{5.52 - 3.01 + 2.04 - 0.92}{4} = 0,91;$$

$$b_2 = \frac{\sum \bar{y}_3}{N} = \frac{5.52 + 3.01 - 2.04 - 0.92}{4} = 1,39;$$

$$b_{12} = \frac{\sum \bar{y}_4}{N} = \frac{5.52 - 3.01 - 2.04 + 0.92}{4} = 0,35.$$

У кожному рядку матриці планування визначалися середні значення дисперсії за проведеними трьома паралельними дослідями (табл. 3.5) за формулою:

$$D = s_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2. \quad (3.7)$$

$$D_1 = s_1^2 = \frac{(5.53 - 5.52)^2 + (5.50 - 5.52)^2 + (5.51 - 5.52)^2}{3 - 1} = 0.0003;$$

$$D_2 = s_2^2 = \frac{(3.03 - 3.01)^2 + (3.00 - 3.01)^2 + (3.01 - 3.01)^2}{3 - 1} = 0.00025;$$

$$D_3 = s_3^2 = \frac{(2.06 - 2.04)^2 + (2.03 - 2.04)^2 + (2.03 - 2.04)^2}{3 - 1} = 0.0003;$$

$$D_4 = s_4^2 = \frac{(0.94 - 0.92)^2 + (0.91 - 0.92)^2 + (0.91 - 0.92)^2}{3 - 1} = 0.0003.$$

Однорідність дисперсії перевірялася за критерієм Кохрена (G- критерієм). Для цього знаходилося відношення максимальної дисперсії до суми всіх дисперсій:

$$G_p = \frac{s_{\max}^2}{\sum_1^N s_i^2}, \quad (3.8)$$

$$G_p = \frac{0.0003}{0.00115} = 0.26.$$

За числами степенів вільності, рівними $f_1 = n - 1 = 3 - 1 = 2$ та $f_2 = N = 4$, а також рівня значущості $q = 0,05$ критичне відношення $G_{1-p} = 0,795$, яке перевищує підраховане $G_p = 0.26$, тобто розрахована дисперсія є однорідною.

Як оцінка для дисперсії відтворюваності обиралася середня дисперсія:

$$s_{\text{відтв}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i^2. \quad (3.9)$$

$$s_{\text{відтв}}^2 = \frac{0,00115}{4} = 0,00029.$$

Дисперсія коефіцієнтів рівняння регресії визначалася для n паралельних дослідів:

$$s_{bj}^2 = \sum_{i=1}^N s_{\text{відтв}}^2 / N \cdot n. \quad (3.10)$$

$$s_{bj} = \sqrt{0,00029 / (4 * 3)} = 0,005.$$

Значущість коефіцієнтів визначалася за критерієм Стюдента. Для всіх коефіцієнтів складалося t - відношення $t_j = b_j / s_{bj}$, що порівнювалося з табличним $t_{1-p}(P; f_3)$ для рівня значущості $P = 0.05$ і числа степенів вільності $f_3 = N(n - 1)$. Якщо виявлялося, що $t_j > t_{1-p}(P; f_3)$, то коефіцієнти значущі.

Знайдене значення t_{1-p} критерію порівнювалося з табличним при заданому числі значущості $P = 0,05$ і відповідному числі степенів вільності $f_3 = 4 (3 - 1) = 8$ і склало $t_{1-p} = 2,31$ [171].

Знаходимо t - відношення кожного коефіцієнта до його дисперсії за формулою:

$$t_0 = \frac{2.87}{0,005} = 574; t_1 = \frac{0,91}{0,005} = 182; t_2 = \frac{1,39}{0,005} = 278; t_{12} = \frac{0,35}{0,005} = 70.$$

Усі коефіцієнти рівняння регресії є значущі, оскільки $t_j > t_{1-p}$.

За результатами регресійного аналізу апроксимуючий поліном набув вигляду:

$$y = 2.87 + 0.91x_1 + 1.39x_2 + 0.35x_1x_2, \quad (3.11)$$

де y – параметр оптимізації, який характеризує витрату вловленого вітровловлювачем повітря;

x_1, x_2 – кодовані значення чинників, які перетворюються в їх натуральні значення за формулою:

$$x_i = (x_j - x_{j0})/\chi_j, \quad (3.12)$$

де x_i – кодоване значення чинника;

x_j – абсолютне значення чинника;

x_{j0} – абсолютне значення основного рівня;

χ_j – інтервал між основним і верхнім рівнями.

Зробивши аналіз коефіцієнтів рівняння регресії можна зробити висновок, що абсолютні значення та знаки відповідних коефіцієнтів відповідним чином впливають на поведінку параметра оптимізації y , а саме: при збільшенні окремо взятих факторів x_1 та x_2 , а також при збільшенні одночасно цих факторів відбувається збільшення величини y .

Отримані результати експериментальних досліджень були оброблені за допомогою програми *Curve fitting toolbox* в *Matlab*. Було досліджено основні варіанти моделі й результати зведено в таблицю 3.6.

Таблиця 3.6

Таблиця обробки результатів експериментальних досліджень

Модель 1	General model: $f(x,y) = p00 + p10 \cdot x + p01 \cdot y + p11 \cdot x \cdot y$ Coefficients (with 95% confidence bounds): $p00 = -0.1959$ (-0.3314, -0.0603) $p01 = 2.489e-05$ (-0.004887, 0.004937) $p10 = 0.9406$ (0.8921, 0.9891) $p11 = 8.678e-05$ (-0.001672, 0.001845) Goodness of fit: SSE: 2.999 R-square: 0.9833 Adjusted R-square: 0.9826 RMSE: 0.1986
-----------------	---

Продовження табл. 3.6

Модель 2	General model: $f(x,y) = p00 + p10 \cdot x + p01 \cdot y$ Coefficients (with 95% confidence bounds): $p00 = -0.2004$ (-0.2999, -0.1008) $p01 = 0.0002251$ (-0.002524, 0.002975) $p10 = 0.9425$ (0.9146, 0.9705) Goodness of fit: SSE: 2.999 R-square: 0.9833 Adjusted R-square: 0.9828 RMSE: 0.1974
Модель 3	General model: $f(x,y) = p00 + p10 \cdot x + p01 \cdot y + p11 \cdot x \cdot y + p21 \cdot x^2 + p22 \cdot y^2$ Coefficients (with 95% confidence bounds): $p00 = 0.08194$ (-0.05988, 0.2238) $p01 = -0.01319$ (-0.02192, -0.004467) $p10 = 0.7192$ (0.6267, 0.8117) $p11 = 8.678e-05$ (-0.001353, 0.001527) $p21 = 0.03932$ (0.02448, 0.05415) $p22 = 0.0002938$ (0.0001216, 0.0004659) Goodness of fit: SSE: 1.956 R-square: 0.9891 Adjusted R-square: 0.9883 RMSE: 0.162

В умовах класичної лінійної множинної регресії, коефіцієнт детермінації приймає значення від 0 до 1. Уважається, що чим ближче коефіцієнт детермінації до 1, тим кращою є модель.

Після аналізу отриманих результатів, де коефіцієнти детермінації для кожної моделі склали: $R\text{-square}_1=0.9833$; $R\text{-square}_2=0.9833$; $R\text{-square}_3=0.9891$, можна зробити висновок, що моделі майже не відрізняються, у такому разі доцільно використовувати спрощену модель. Простішою є модель № 1 із коефіцієнтом детермінації 0.9833, скоригованим коефіцієнтом детермінації 0.9826 та рівнянням:

$$f(x,y) = p00 + p10 \cdot x + p01 \cdot y + p11 \cdot x \cdot y, \quad (3.13)$$

де α – кут набігаючого потоку повітря α , градусів;

V – швидкість набігаючого потоку V , м/с.

За отриманим рівнянням було побудовано залежність швидкості вловленого вітровловлювачем повітря $V_{\text{в/в}} = f(\alpha; V)$ (рис. 3.8).

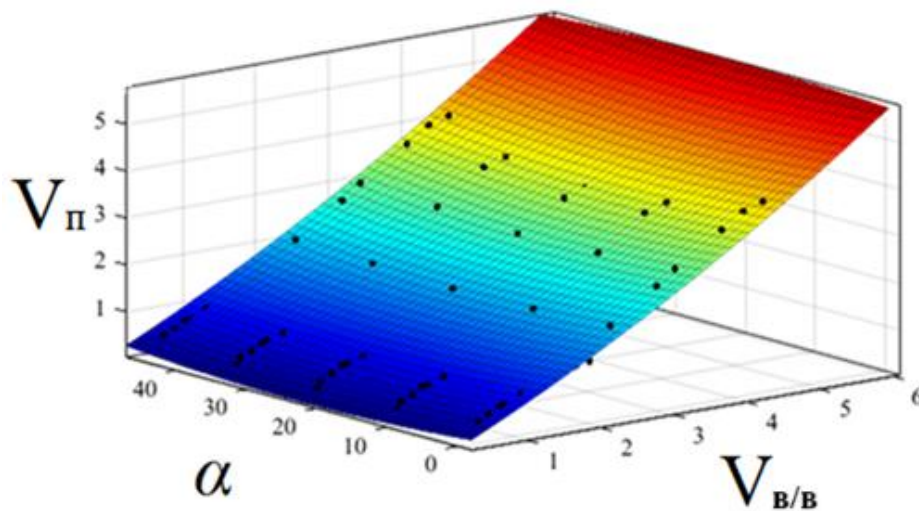


Рис. 3.8. Залежність швидкості вловленого вітровловлювачем повітря $V = f(\alpha; V)$: V_n – швидкість набігаючого потоку повітря, м/с; $V_{\text{в/в}}$ – швидкість вловленого вітровловлювачем повітря, м/с; α – кут набігаючого потоку повітря, градуси

Зробивши аналіз отриманого рівняння, можна отримати підтвердження раніше зробленого висновку, що збільшення значень кута набігаючого потоку повітря α , і швидкість набігаючого потоку, V_n , мають значний вплив на швидкість вловленого вітровловлювачем повітря, $V_{\text{в/в}}$.

3.4. Оцінювання похибок проведеного експерименту

Визначення похибок вимірювань проводилося за розрахунком похибок паралельних дослідів [176].

Середнє арифметичне кожного з трьох паралельних рандомізованих дослідів $\bar{y}$ дорівнює сумі всіх n окремих результатів, поділених на n (формула 3.6).

Відхилення для всіх $\bar{y}$ можна зобразити як різницю $\Delta y = y_i - \bar{y}$. Наявність Δy свідчить про варіацію значень повторних дослідів. Для вимірювання цієї варіації використовується дисперсія (s^2).

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_1^n \Delta y_i^2; \quad (3.14)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \Delta y_i^2, \quad (3.15)$$

де $n-1$ – кількість степенів вільності, яка є на 1 меншою від кількості дослідів.

Середнє квадратичне відхилення величини $\sum_{i=1}^n y_i$ від середнього значення $\bar{y}$ розраховувалося за формулою:

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2 \pm \Delta \Sigma}, \quad (3.16)$$

де S – середнє квадратичне відхилення, або квадратична похибка;

$\Delta \Sigma$ – сумарна абсолютна похибка вимірювальних систем визначалася за формулою:

$$\Delta \Sigma = \pm \sqrt{\Sigma \Delta^2 \Sigma_i} \quad (3.17)$$

де $\Delta \Sigma$ – загальна кількість похибок за всіма елементами вимірювальної системи;

Σ_i – сумарна похибка i -го елемента системи.

Похибки вимірювальних систем наведено в табл. 3.7.

Таблиця 3.7

Визначення похибок вимірювань

Назва вимірюного елемента	Абсолютна похибка	Відносна похибка	
		мінімальна, %	максимальна, %
Рухомість повітря (термоанемометр АТТ – 1004)	$\pm 0,005 \text{ м/с}$	0,6	1,25

Гранично допустимою помилкою вимірювань приймалося стале значення середньоквадратичної похибки:

$$\Delta n p = 3S. \quad (3.18)$$

Якщо похибка перевищувала Δpr , яка за розрахунками склала $\Delta pr = 0,17$, то похибка вимірювань виключалася з розрахунків, а дослід повторювався. Сумарна похибка всіх вимірювальних систем склала 2,1%.

3.5. Аналіз збіжності експериментальних досліджень і результатів комп'ютерного моделювання

Для моделювання гідродинамічних характеристик вітровловлювача було використано методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) у програмному забезпеченні SolidWorks Flow Simulation. Цей інструмент дозволяє розв'язувати рівняння Нав'є-Стокса для передбачення поведінки потоку повітря в межах і поза межами вітровловлювача.

У процесі моделювання було виконано детальне дослідження поведінки повітряного потоку навколо та всередині конструкції вітровловлювача. Основні етапи моделювання, представлені на рис. 2.3 – 2.5, та отримані результати наведено в табл. 3.8.

Табл. 3.8

Основні етапи моделювання та отримані результати

Етапи моделювання	Отримані результати моделювання
1	2
Аналіз обтікання повітряним потоком у горизонтальній площині	Досліджено динаміку руху повітря при різних швидкостях потоку (від 0,5 м/с до 25 м/с), що дозволило визначити аеродинамічні характеристики вітровловлювача в плані
Аналіз обтікання повітряним потоком у вертикальній площині	Досліджено взаємодію повітряного потоку з конструкцією вітровловлювача в розрізі висоти, що дозволило оцінити ефективність вловлювання повітряного потоку в різних умовах

Продовження табл. 3.8

1	2
Моделювання розподілу тиску	Дослідження дало змогу ідентифікувати області з підвищеним і зниженим тиском та оцінити вплив цих зон на роботу вітровловлювача
Взаємодія повітряного потоку з конструкцією вітровловлювача	Досліджено особливості поведінки потоку при проходженні через внутрішні компоненти вітровловлювача, включаючи напрямні ребра та жалюзі (заслінки), що дозволило оцінити ефективність перетворення кінетичної енергії у вихровий рух
Моделювання повітряного потоку для різних кліматичних умов	Проведено аналіз роботи вітровловлювача за умов теплої та холодної періодів року, що дозволило оцінити вплив температурних градієнтів та сезонних змін на ефективність вентиляції

Для забезпечення вірогідності порівняння результатів, моделювання виконувалося з використанням тих самих геометричних параметрів вітровловлювача, що й в експериментальній установці (рис. 2.1). Граничні умови були встановлені таким чином, щоб максимально відповідати реальним умовам експерименту:

- значення швидкостей набігаючого потоку варіювалися в межах від 0,4 м/с до 6 м/с, що відображає реальні умови функціонування вітровловлювача в кліматичних умовах м. Кривий Ріг;

- значення кутів набігаючого потоку варіювалися в діапазоні від 0° до 45°, що дозволило оцінити вплив напрямку повітряного потоку на аеродинамічні характеристики вітровловлювача;

- температура внутрішнього повітря була прийнята на рівні +20 °С, що відповідає стандартним умовам для оцінювання ефективності вентиляційних систем (пункт 2.3);

– атмосферний тиск було встановлено на рівні 101325 Па (нормальні атмосферні умови), що забезпечило точність симуляцій і можливість узгодження даних моделювання з експериментальними результатами (пункт 2.3).

Для аналізу збіжності результатів комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень проводилося порівняння двох ключових параметрів:

- витрати вловленого вітровловлювачем повітря ($\text{м}^3/\text{год}$) залежно від швидкості та кута набігаючого потоку;
- профілів швидкості в горизонтальній і вертикальній площинах.

На рис. 3.4 наведено залежності витрати повітря від швидкості набігаючого потоку при різних кутах набігаючого потоку. Дані демонструють, що результати моделювання відтворюють основні закономірності поведінки повітряного потоку з високим ступенем відповідності, точно відображаючи зміну витрати повітря при зміні швидкості та кута набігаючого потоку.

Між результатами моделювання та експерименту було встановлено такі збіги:

- модельовальні та експериментальні дані свідчать, що зі зростанням швидкості набігаючого потоку спостерігається збільшення витрати вловленого повітря;
- обидва методи підтверджують вплив кута набігаючого потоку на витрату вловленого вітровловлювачем повітря.

Результати моделювання демонструють дещо завищені значення витрати повітря порівняно з експериментальними даними (на 3-8 % залежно від швидкості потоку та кута набігаючого потоку). Така розбіжність може бути зумовлена застосуванням ідеальних умов при моделюванні, зокрема відсутністю врахування реальних фізичних властивостей матеріалів корпусу або неточностями в моделюванні турбулентних процесів. Крім того, можливий вплив похибки самого вимірювального обладнання, яке було використано під час експериментів, на отримані дані. Водночас зазначена розбіжність входить у межі мінімальної

похибки, що підтверджує високу вірогідність та адекватність результатів моделювання.

Було використано кількісні статистичні методи для аналізу узгодженості результатів експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання. Застосування середньоквадратичного відхилення дозволило визначити середню розбіжність між експериментальними та моделювальними даними витрати повітря, яка склала 5.2%. Це підтверджує прийнятний рівень точності отриманих даних і демонструє високу відповідність між методами. Під час аналізу коефіцієнта кореляції було встановлено значення 0.97, що свідчить про сильний статистичний зв'язок між результатами експерименту й моделювання, підкреслюючи високу надійність моделювальних даних. Максимальна похибка, зафіксована для кутів набігаючого потоку, досягала 8%. Незважаючи на це, такі розбіжності знаходяться в межах допустимих значень, що підтверджує можливість застосування отриманих результатів моделювання в практичних умовах.

Було визначено можливі причини розбіжностей між експериментальними даними та результатами комп'ютерного моделювання. Однією з таких причин є спрощення фізичних моделей, зокрема, припущення ламінарності потоку в умовах, де фактично домінує турбулентність. Також можливі неточності вимірювань, що можуть виникати через похибки термоанометра. Неврахування впливу температурних градієнтів і вологості в реальних умовах могло спричинити певні відхилення в результатах.

Було встановлено, що комп'ютерне моделювання, виконане у SolidWorks Flow Simulation, демонструє високий рівень відповідності експериментальним даним, що підтверджується коефіцієнтом кореляції 0,97. Така збіжність результатів свідчить про те, що метод моделювання може бути ефективно застосований для прогнозування гідродинамічних характеристик вітровловлювача ще на етапах його проектування. Розбіжності, що не перевищують 8%, є прийнятними в інженерній практиці, проте для подальшого підвищення точності моделі доцільно враховувати вплив додаткових фізичних факторів, таких як температурні градієнти та вологість.

Отримані результати моделювання можуть слугувати основою для оптимізації конструкції вітровловлювача, а також для планування його ефективної експлуатації в реальних умовах із мінімізацією енерговитрат.

3.6. Визначення коефіцієнта місцевого опору вітровловлювача

3.6.1. Схема експериментальної установки

Дослідження коефіцієнта місцевого опору вітровловлювача проводилося на експериментальній установці, схема якої наведена на рис. 3.1.

За допомогою мановакууметра МЦ-1-10 та трубки Піто-Прандтля вимірювалися повний тиск перед вітровловлювачем, повний та динамічний тиски після вітровловлювача.

3.6.2. Порядок проведення експерименту

У класичній аеродинамічній практиці визначення коефіцієнта місцевого опору елемента ґрунтується на порівнянні повного тиску потоку до та після обтікання досліджуваного елемента. Такий підхід передбачає можливість безпосереднього вимірювання втрат повного тиску, спричинених геометрією елемента в потоці.

У випадку вітровловлювача умови експерименту істотно відрізняються від класичної методики визначення коефіцієнта місцевого опору. Конструктивне виконання вітровловлювача передбачає приєднання повітропроводу до його нижньої частини, причому цей повітропровід розташовується майже перпендикулярно до напрямку повітряного потоку. Така конфігурація призводить до того, що частина повітряного потоку огинає вітровловлювач, а інша уловлюється ним і спрямовується у повітропровід сталого діаметра. У зв'язку з цим неможливо відтворити умови вільного обтікання потоком, які враховуються в класичних методиках визначення коефіцієнта місцевого опору. Тому для

експериментального визначення коефіцієнта місцевого опору в даній роботі застосовується модифікований підхід, що базується на одночасному вимірюванні повного тиску перед вітровловлювачем, повного тиску після нього у вентиляційному каналі та динамічного тиску в тому ж каналі. Така методика дозволяє адекватно врахувати енергетичні втрати потоку, зумовлені геометрією вітровловлювача, і водночас забезпечує відповідність умовам реальної експлуатації, де уловлене повітря одразу спрямовується у канал із фіксованим поперечним перерізом.

Експеримент проводився за такою методикою:

1. Вмикався нагнітач повітря (вентилятор).
2. За допомогою термоанемометра та трубки Піто-Прандтля вимірювався повний тиск набігаючого на вітровловлювач повітряного потоку в точці перед вітровловлювачем.
3. За допомогою термоанемометра та трубки Піто-Прандтля вимірювалися динамічний та повний тиск вловленого вітровловлювачем повітря у вікні для зняття показників.
4. Змінювалася швидкість набігаючого повітряного потоку й повторювалися дії пунктів 2 та 3.

Для вимірювання тиску повітряного потоку використовувався мановакууметр МЦ-1-10 із трубкою Піто-Прандтля з діапазоном вимірювання від 0 до 10 кПа та абсолютною похибкою не більше $\pm(0,012+0,0025P_{\text{вимір}})$ кПа, де $P_{\text{вимір}}$ – виміряний тиск, кПа.

Після проведення дослідів коефіцієнт місцевого опору вітровловлювача визначався за формулою:

$$\xi_{\text{в/в}} = \frac{P_{\text{повн.1}} - P_{\text{повн.2}}}{P_{\text{динам.2}}}, \quad (3.19)$$

де $P_{\text{повн.1}}$ – повний тиск перед вітровловлювачем, Па;

$P_{\text{повн.2}}$ – повний тиск після вітровловлювача, Па;

$P_{\text{динам.2}}$ – динамічний тиск після вітровловлювача, Па.

Швидкість повітряного потоку після вітровловлювача розраховувалась за формулою, м/с:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{\text{динам.2}}}{\rho}}, \quad (3.20)$$

де ρ – густина повітряного потоку, кг/м^3 ; при температурі повітря $+30^\circ\text{C}$ приймаємо $\rho = 1,164 \text{ кг/м}^3$.

На рис. 3.9. наведено розташування точок замірювання показників тиску повітряного потоку до та після вітровловлювача.

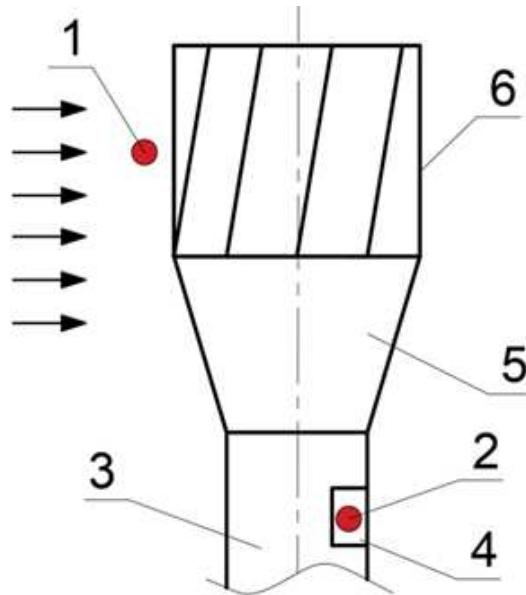


Рис. 3.9. Точки замірювання тиску повітряного потоку: 1 – точка замірювання тиску набігаючого на вітровловлювач повітряного потоку; 2 – точка замірювання тиску вловленого вітровловлювачем повітря; 3 – вентиляційний канал; 4 – вікно для зняття показників; 5 – конфузор; 6 – корпус вітровловлювача

3.6.3. Результати експериментальних досліджень

Дослідження проводилися на експериментальній установці (рис. 3.2). Результати експериментальних досліджень наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9

Результати експериментальних досліджень

$P_{\text{повн.1}}, \text{Па}$	11	14	16	19	25	31	40	45
$P_{\text{повн.2}}, \text{Па}$	7	9	10	11	14	17	20	22
$P_{\text{динам.2}}, \text{Па}$	3	4	5	6	9	11	16	18
$\xi_{\text{в/в}}$	1,33	1,25	1,2	1,33	1,22	1,27	1,25	1,28
$V_2, \text{м/с}$	2,27	2,62	2,93	3,21	3,93	4,35	5,24	5,56

**Примітка: вимірювання проводилися за допомогою приладу мановакууметр МЦ-1-10 з мінімальною ціною поділки 1 Па, що не дало змоги провести дослідження в умовах низької швидкості набігаючого повітряного потоку.*

Усереднене значення коефіцієнта місцевого опору вітровловлювача для наведеної кількості дослідів склало: $\xi_{\text{в/в}}(\text{усер.}) = 1,27$.

На рис. 3.10 наведено графічну залежність коефіцієнта місцевого опору вітровловлювача, $\xi_{\text{в/в}}$ від швидкості повітряного потоку після вітровловлювача, V_2 , м/с.

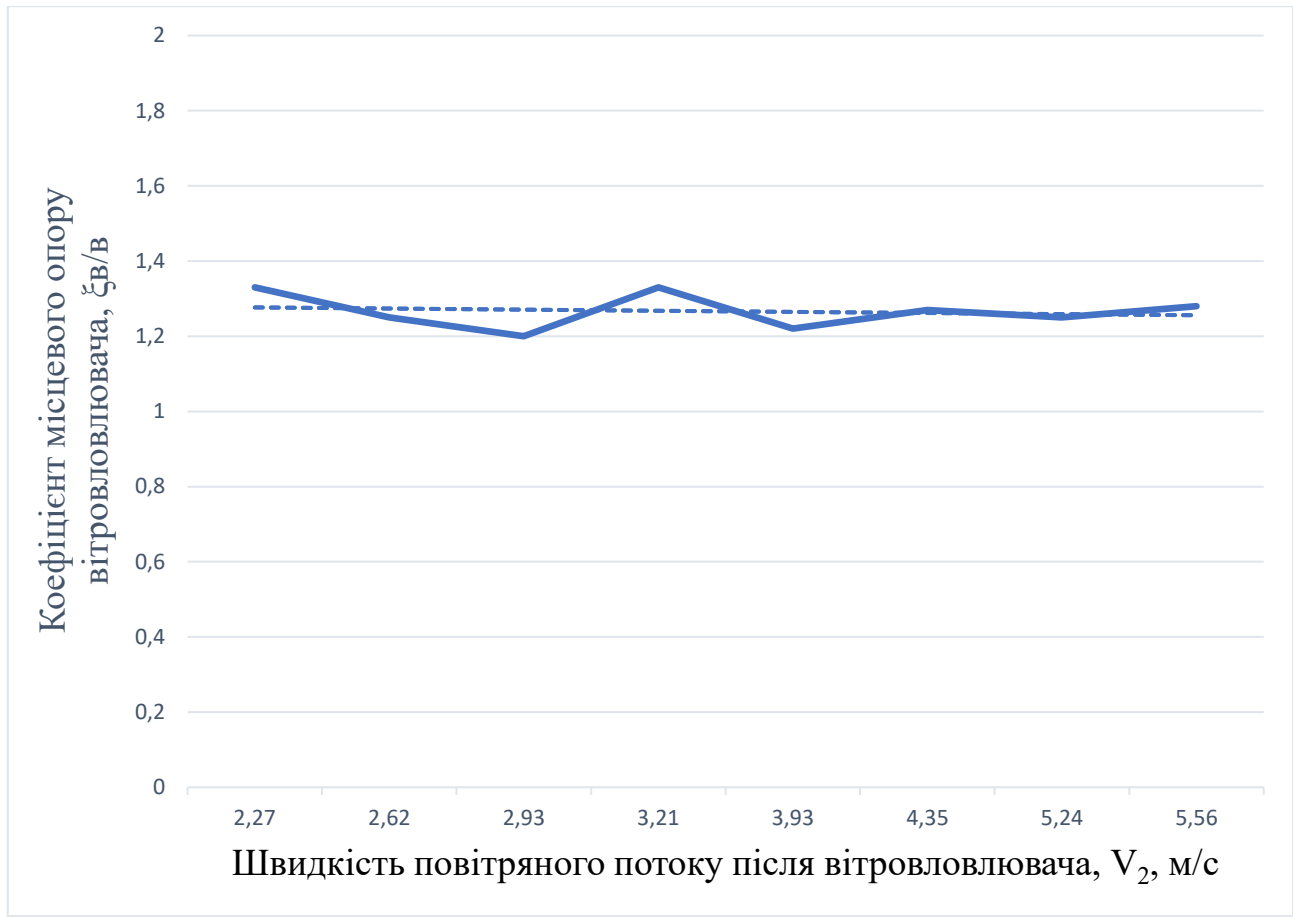


Рис. 3.10. Графічна залежність коефіцієнта місцевого опору вітровловлювача, $\xi_{в/в}$ від швидкості повітряного потоку після вітровловлювача, V_2 , м/с.

Дані графічної залежності було апроксимовано та отримано рівняння для визначення коефіцієнта місцевого опору вітровловлювача, $\xi_{в/в}$:

$$\xi_{в/в} = -0,003 \cdot V_2 + 1,2796; \quad (3.21)$$

$$R^2 = 0,0242.$$

Результати апроксимації (3.21) демонструють, що зміна швидкості повітряного потоку практично не впливає на величину коефіцієнта місцевого опору вітровловлювача. Це підтверджується тим, що чисельний коефіцієнт при V_2 становить лише 0.003, що фактично нівелює вплив швидкості набігаючого повітряного потоку на розрахункове значення коефіцієнта місцевого опору. Додатково низьке значення коефіцієнта детермінації ($R^2 = 0,0242$), отримане в результаті апроксимації графічної залежності, свідчить про відсутність залежності

між швидкістю набігаючого повітряного потоку та коефіцієнтом місцевого опору. Таким чином, зміна швидкості набігаючого повітряного потоку у реальних умовах експлуатації не призводить до суттєвих змін значення коефіцієнта місцевого опору вітровловлювача, що вказує на стабільність його гідродинамічних характеристик.

Враховуючи незначну різницю між усередненим значенням коефіцієнта місцевого опору вітровловлювача, $\xi_{в/в}$ (усер.) та апроксимованою емпіричною формулою (3.21), а також з метою спрощення інженерних розрахунків без втрати їх точності, за усереднене значення коефіцієнта місцевого опору вітровловлювача прийнято $\xi_{в/в} = 1,28$.

3.7. Висновки до розділу 3

У третьому розділі здійснено комплексне дослідження гідродинамічних характеристик вітровловлювача пасивної системи вентиляції за допомогою експериментальної установки, що дозволило оцінити його ефективність при різних умовах. Експериментальна методика включала аналіз впливу швидкості та кута набігаючого потоку повітря на витрату вловленого вітровловлювачем повітря, що є критично важливим для розуміння його роботи в реальних умовах.

Для проведення експериментальних досліджень було враховано результати аналізу гідродинамічних характеристик, розглянутих у II розділі. На їх основі було визначено ключові параметри експерименту:

- для проведення коректного порівняння отриманих результатів швидкості набігаючого потоку в експериментальному дослідженні та при моделюванні була обрана в межах від 0.4 до 6 м/с;
- для оцінювання впливу напрямку повітряного потоку на ефективність роботи вітровловлювача кути набігаючого потоку повітря приймалися в межах від 0° до 45° ;

– для забезпечення достовірності аналізу отриманих даних геометричні параметри вітровловлювача в експериментальній моделі відповідали характеристикам, використаним при комп'ютерному моделюванні (рис. 2.1).

Результати досліджень засвідчили, що основним чинником, який впливає на витрату повітря, є швидкість набігаючого потоку. Максимальний ККД вітровловлювача (94,4%) було досягнуто при кутах набігаючого потоку 0° та 45° , що свідчить про здатність конструкції ефективно працювати при різних умовах. Мінімальний ККД, зафіксований при куті $22,5^\circ$ (86,1%), також перебуває в межах високих показників, що підтверджує універсальність і стабільність роботи вітровловлювача.

Обробка результатів експериментальних досліджень із застосуванням регресійного аналізу дозволила отримати рівняння, яке описує залежність витрати вловленого повітря від основних параметрів. Використання інструментарію математичного моделювання й методів кількісного аналізу, зокрема середньоквадратичного відхилення і коефіцієнта детермінації, дозволило підтвердити точність отриманих даних і високу відповідність між експериментальними результатами та результатами моделювання.

Порівняння експериментальних даних із результатами комп'ютерного моделювання, виконаного у програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation, засвідчило високий рівень збіжності. Коефіцієнт кореляції (0.97) та розбіжності, що не перевищують 8%, свідчать про вірогідність моделювання для прогнозування гідродинамічних характеристик вітровловлювача. Проте виявлено, що для подальшого вдосконалення моделі доцільно враховувати додаткові фізичні чинники, такі як температурні градієнти, вологість і реальні фізичні властивості матеріалів.

Виявлені розбіжності між результатами експерименту й моделювання можна пояснити спрощенням фізичних моделей, припущеннями про ламінарність потоку в умовах турбулентності, а також впливом похибки вимірювального обладнання.

Тим не менш, ці фактори незначно вплинули на узгодженість даних, що підтверджує можливість практичного застосування отриманих результатів.

Визначено коефіцієнт місцевого опору вітровловлювача. Проведені експериментальні дослідження та подальша апроксимація отриманих результатів показали, що величина коефіцієнта місцевого опору вітровловлювача практично не залежить від швидкості набігаючого повітряного потоку. Це підтверджується як малим значенням чисельного коефіцієнта при швидкості (0,003), так і низьким коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0,0242$), що вказує на відсутність залежності. У результаті для подальших розрахунків доцільно приймати усереднене значення коефіцієнта місцевого опору вітровловлювача, яке складає $\xi_{в/в} = 1,28$.

Отже, проведені експериментальні дослідження дозволили не лише оцінити ефективність роботи вітровловлювача, але й розробити рекомендації щодо його оптимізації та подальшого вдосконалення. Здобуті результати можуть бути використані для планування та впровадження пасивних вентиляційних систем з високою енергоефективністю.

РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАСИВНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ З ВІТРОВЛОВЛЮВАЧЕМ

Енергоощадні будинки потребують раціональних рішень щодо влаштування вентиляційних систем, які забезпечують стабільний повітрообмін із мінімальними витратами енергії. Пасивні вентиляційні системи, зокрема із вітровловлювачами, сприяють зниженню споживання електроенергії та підтримці комфортного мікроклімату в приміщеннях. Однак їх ефективне впровадження вимагає проведення детальних гідродинамічних розрахунків, які враховують особливості руху повітря, втрати тиску та умови експлуатації.

У попередніх розділах було виконано числове моделювання (розділ 2) та експериментальні дослідження гідродинамічних характеристик вітровловлювача пасивної системи вентиляції (розділ 3). Отримані результати дозволили встановити взаємозв'язки між ключовими параметрами роботи пристрою, такими як швидкість набігаючого потоку, кут набігаючого потоку, втрати тиску в повітропроводах та ефективність повітрообміну.

Основною метою цього розділу є розроблення методики інженерного розрахунку пасивної вентиляційної системи з вітровловлювачем, що дозволить визначити раціональні параметри його роботи з урахуванням будівельних характеристик, кліматичних факторів і експлуатаційних умов. У межах цього розділу представлено алгоритм обчислення гідродинамічних характеристик, методику визначення продуктивності системи та алгоритм інженерного розрахунку вентиляції, спрямований на підтримання параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках.

4.1. Методика інженерного розрахунку гідродинамічних характеристик пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем

Методика розрахунку гідродинамічних характеристик пасивної вентиляційної системи з вітровловлювачем ґрунтується на використанні рівнянь руху рідини та

газу з урахуванням конструктивних особливостей системи, а також зовнішніх впливів. Послідовність дій забезпечує отримання параметрів, необхідних для оцінювання ефективності роботи системи в реальних умовах експлуатації.

У системах природної вентиляції повітря переміщається в каналах і повітропроводах під дією різниці тисків між холодним зовнішнім і теплим внутрішнім повітрям (рис. 1.24). Природний (гравітаційний) тиск $P_{гр}$ визначається за формулою:

$$P_{гр} = h \cdot g \cdot (\rho_z - \rho_v), \text{ Па}, \quad (4.1)$$

де h – висота повітряного стовпа, що відповідає довжині вертикальної частини вентиляційного каналу, м;

ρ_z, ρ_v – густина, відповідно, зовнішнього та внутрішнього повітря:

$$\rho = 353 / (273 + t'), \text{ кг/м}^3, \quad (4.2)$$

де $t_z, t_{в.сер}$ – температура припливного (зовнішнього) та середня температура внутрішнього повітря, $^{\circ}\text{C}$.

Аналізуючи формулу (4.1), можна зробити декілька висновків:

- збільшення висоти вертикального вентиляційного каналу (від вітровловлювача до приміщення) збільшує перепад тиску, забезпечуючи інтенсивніше переміщення припливного повітря;
- природний тиск стає більшим при низькій температурі зовнішнього повітря й помітно зменшується в теплу пору року;
- охолодження повітря у вентиляційних каналах знижує діючий тиску і може призводити до випадання конденсату;
- горизонтальна довжина повітропроводів істотно не впливає на величину гравітаційного тиску.

При порівняно невеликих швидкостях руху й перепадах тиску повітря можна розглядати як нестисливу рідину, для якої властиве нерозривне заповнення труби та справедливі такі рівняння гідроаеродинаміки, як рівняння нерозривності потоку й рівняння Бернуллі.

Для усталеного руху повітря рівняння нерозривності має вигляд:

$$L_1 = L_2 = \dots = L_n = \text{const}, \quad (4.3)$$

тобто витрати ($L_1, L_2, \dots L_n$) через усі живі перерізи потоку є величиною сталою.

Якщо витрати виразити через середню швидкість повітряного потоку та площу перерізу труби, то рівняння нерозривності набере вигляду:

$$V_1 \cdot F_1 = V_2 \cdot F_2 = \text{const}, \quad (4.4)$$

де V_1, V_2 – швидкості повітряного потоку в перерізах 1 і 2, які показані на рис. 4.1, м/с;

F_1, F_2 – площі поперечного перерізу повітропроводу в перерізах 1 і 2, м².

Така форма запису дає можливість проаналізувати вплив деяких факторів на швидкість руху повітря, наприклад:

$$V_1 / V_2 = F_2 / F_1. \quad (4.5)$$

При внутрішніх діаметрах повітропроводу d_1 і d_2 рівняння (4.5) набере вигляду:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{F_2}{F_1} = \frac{\pi \cdot d_2^2 \cdot 4}{\pi \cdot 4 \cdot d_1^2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}, \quad (4.6)$$

де d_1, d_2 – діаметри повітропроводу в перерізах 1 і 2, мм (Рис. 4.1).

У природних вентиляційних системах повітря переміщується за рахунок різниці тисків. При цьому змінюються швидкість, статичний тиск і кінетична енергія потоку. У процесі проходження повітря через вітровловлювач відбувається його прискорення або сповільнення, що спричиняє відповідні зміни тиску. Це можна пояснити законами гідродинаміки, згідно з якими сума статичного й динамічного тисків для будь-якого перерізу повітряного потоку залишається сталою (за умови відсутності втрат енергії):

$$P_{\text{ст}} + P_{\text{д}} = \text{const}; \quad (4.7)$$

$$P_{\text{д}} = \frac{\rho \cdot V^2}{2}. \quad (4.8)$$

Зі схеми, зображеної на рис. 4.1, можна записати рівняння Бернуллі для зображеного фрагмента повітропроводу:

$$P_{\text{ст1}} + \frac{\rho \cdot V_1^2}{2} = P_{\text{ст2}} + \frac{\rho \cdot V_2^2}{2}, \quad (4.9)$$

де $P_{\text{ст1}}, P_{\text{ст2}}$ – статичний тиск у перерізах 1 і 2, Па.

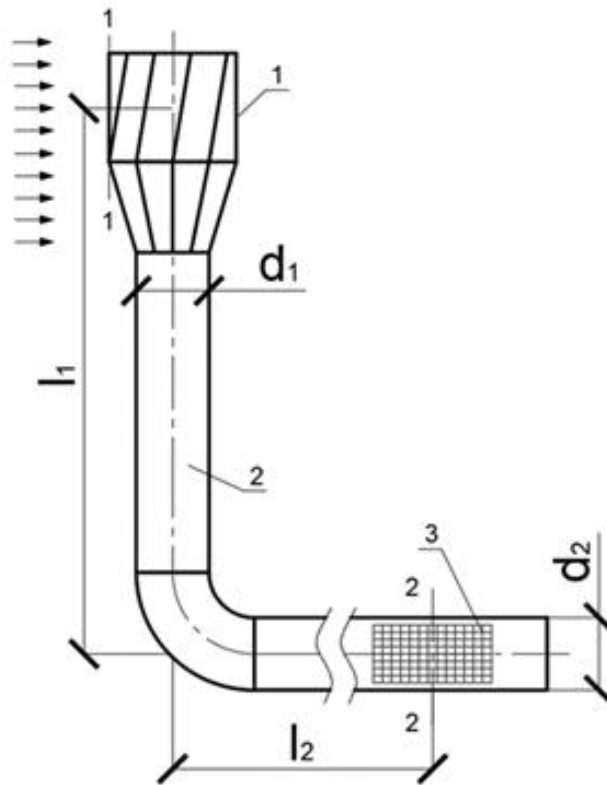


Рис. 4.1. Схематичне зображення припливної системи вентиляції з вітровловлювачем: 1 – вітровловлювач; 2 – повітропровід; 3 – припливна решітка

Швидкість повітряного потоку можна визначити за формулою (4.8):

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot P_D}{\rho}}, \text{ м/с} \quad (4.10)$$

або розрахувати за залежністю:

$$V = \frac{L}{3600 \cdot F} = \frac{L}{3600 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{п}}^2}{4}}, \quad (4.11)$$

де L – витрата повітря на ділянці, $\text{м}^3/\text{год}$; F – площа поперечного перерізу повітропроводу, м^2 ; $d_{\text{п}}$ – діаметр повітропроводу, м .

Вимірявши статичний і динамічний тиски повітряного потоку в перерізах повітропроводу 1 і 2, рівняння Бернуллі, з урахуванням втрат тиску повітря між перерізами, матиме вигляд:

$$P_{\text{ст1}} + \frac{\rho \cdot V_1^2}{2} = P_{\text{ст2}} + \frac{\rho \cdot V_2^2}{2} + \Delta P_{1-2}, \quad (4.12)$$

де ΔP_{1-2} – втрати тиску повітря між перерізами 1 та 2, Па.

При русі повітря повітропроводом виникають втрати енергії й відповідні втрати тиску $\Delta P_{\text{заг}}$, Па. Розрізняють два види втрат тиску: по довжині ΔP_l та на місцеві опори $\Delta P_{\text{м.о.}}$. Загальні втрати тиску визначаються за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$\Delta P_{\text{заг}} = \Delta P_l + \Delta P_{\text{м.о.}}, \text{ Па.} \quad (4.13)$$

Втрати тиску по довжині визначаються залежно від динамічного тиску за формулою Дарсі:

$$\Delta P_l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}, \text{ Па,} \quad (4.14)$$

де l – довжина ділянки повітропроводу, м;

d – діаметр повітропроводу, м;

λ – коефіцієнт опору тертя (або коефіцієнт Дарсі), що залежить від режиму руху (визначається за числом Re) і від шорсткості стінок повітропроводу; визначається за формулою Альтшуля:

$$\lambda = 0,011 \cdot \left(\frac{k_e}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (4.15)$$

де k_e – шорсткість стінок повітропроводу, яка залежить від матеріалу, для сталевих повітропроводу $k_e = 1 \cdot 10^{-4}$, м;

Re – число Рейнольдса, що характеризує відношення сил інерції та в'язкості:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}, \quad (4.16)$$

де ν – значення кінематичної в'язкості повітря, яка для температури $+20^\circ\text{C}$ становить $1,5 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Для інженерних розрахунків для визначення втрати тиску по довжині можна використати формулу:

$$\Delta P_l = R \cdot l \cdot \beta_{\text{ш}}, \text{ Па,} \quad (4.17)$$

де $\beta_{\text{ш}}$ – коефіцієнт, що враховує шорсткість стінок повітропроводу; для сталевих повітропроводів жорсткістю $K = 0.1$ приймаємо $\beta_{\text{ш}} = 1$;

l – довжина повітропроводу, м;

R – питомі витрати на подолання опору тертя на ділянці завдовжки 1 м; визначаються з таблиць, номограм або за формулою:

$$R = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}, \text{ Па/м.} \quad (4.18)$$

Втрати тиску в місцевих опорах зумовлюються фасонними частинами повітропроводу та розраховуються за формулою:

$$\Delta P_{\text{м.о.}} = \sum \xi_i \cdot P_d = \sum \xi_i \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}, \text{ Па,} \quad (4.19)$$

де $\sum \xi_i$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів; залежить від того, як змінюється швидкість потоку.

Для нормальної роботи системи природної вентиляції повинна виконуватись умова:

$$\Delta P \leq P_{\text{гр}}, \quad (4.20)$$

де ΔP – загальні втрати тиску, Па;

$P_{\text{гр}}$ – природний (гравітаційний) тиск, Па.

Одним із ключових параметрів, який визначає ефективність роботи пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем, є аеродинамічний опір, який враховує взаємодію повітряного потоку з конструкцією вітровловлювача, втрати тиску на вході та процесів утворення вихорів. Розрахунок аеродинамічного опору спирається на результати експериментальних досліджень, наведених у розділі 3, що дозволяють оцінити вплив кожного з вказаних факторів на загальну продуктивність системи.

При визначенні аеродинамічного опору вітровловлювача потрібно враховувати такі параметри: швидкість і кут набігаючого повітряного потоку, форму та геометричні розміри вітровловлювача, наявність рухомих жалюзі (заслінок) і внутрішню конфігурацію пучка напрямних вигнутих ребер, які надають повітряному потоку вихровий рух. Аеродинамічний опір вітровловлювача можна визначити за формулою:

$$\Delta P_{\text{в/в}} = P_{\text{ст1}} - P_{\text{ст2}} = \xi_{\text{в/в}} \cdot \frac{\rho \cdot V_{\text{п}}^2}{2}, \text{ Па,} \quad (4.21)$$

де $P_{\text{ст1}}$ – статичний тиск перед вітровловлювачем, Па;

$P_{ст2}$ – статичний тиск після вітровловлювача, Па;

$\xi_{в/в}$ – коефіцієнт місцевого опору вітровловлювача;

$V_{п}$ – швидкість набігаючого повітряного потоку, м/с.

Окрім втрати тиску у вітровловлювачі, потрібно враховувати загальний опір вентиляційної системи:

$$\Delta P_{заг} = \Sigma(\xi_i \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}) , \text{ Па}, \quad (4.22)$$

де ξ_i – коефіцієнти місцевих опорів кожного елемента вентиляційної системи.

Ключовим етапом при розрахунку ефективності пасивної вентиляційної системи є аналіз залежності швидкості повітряного потоку від конструктивних параметрів вітровловлювача, який ґрунтується на комп'ютерному моделюванні (розділ 2), експериментальних дослідженнях (розділ 3) і дозволить отримати більш точні розрахункові параметри.

Для визначення швидкості набігаючого повітряного потоку після вітровловлювача до рівняння Бернуллі для двох перерізів (перед вітровловлювачем та по осі припливної решітки) (рис. 4.1) слід додати вираз, який враховує аеродинамічний опір вітровловлювача:

$$P_{атм} + \frac{\rho \cdot V_{п}^2}{2} = P_{в/в} + \frac{\rho \cdot V_{в/в}^2}{2} + \xi_{в/в} \cdot \frac{\rho \cdot V_{в/в}^2}{2} ;$$

і отримаємо:

$$P_{атм} - P_{в/в} = \frac{\rho}{2} \cdot (V_{в/в}^2 \cdot (\xi_{в/в} + 1) - V_{п}^2), \quad (4.23)$$

де $P_{в/в}$ – втрати тиску у вітровловлювачі, Па;

$V_{в/в}$ – швидкість повітряного потоку після вітровловлювача, м/с;

+1 – урахування перетворення статичного тиску в динамічний.

Для коректного обґрунтування розрахунків слід враховувати фізичний зміст рівняння Бернуллі та вплив додаткових чинників на формування швидкості повітряного потоку після вітровловлювача. Однак у реальних умовах на значення швидкості впливають не лише цей перепад, а й аеродинамічні втрати, спричинені тертям, вихроутворенням і локальними опорами.

Важливо зазначити, що у формулі (4.23) втрати тиску не враховані явно, проте вони можуть бути частково відображені в зміненому значенні статичного тиску після вітровловлювача. Це означає, що отримана швидкість не враховує можливе зменшення енергії потоку через розсіювання. Для більш точного визначення швидкості потоку слід вводити додаткові коригувальні коефіцієнти, що відображають вплив втрат на загальний баланс енергії в системі.

Після перетворення формули (4.21) формула швидкості повітряного потоку після вітровловлювача матиме вигляд:

$$V_{B/B} = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{\text{атм}} - P_{B/B})}{\rho \cdot (\xi_{B/B} + 1)}}, \text{ м/с.} \quad (4.24)$$

Швидкість набігаючого потоку є одним із ключових параметрів, що визначає продуктивність вітровловлювача. Її зміна впливає як на загальний об'єм повітря, що надходить у систему вентиляції, так і на аеродинамічні характеристики самого вітровловлювача.

Ефективність роботи вітровловлювача в різних режимах експлуатації та кліматичних умовах визначається комплексним аналізом, що враховує аеродинамічні характеристики, втрати тиску та вплив зовнішніх чинників. На підставі проведених експериментальних досліджень (розділ 3) було визначено, що ефективність вітровловлювача залежить від кута та швидкості набігаючого повітряного потоку. Наведені вище формули дозволяють оцінити втрати тиску в системі, а також визначити залежність швидкості потоку від конструктивних параметрів вітровловлювача.

У процесі аналізу було встановлено, що при низьких швидкостях набігаючого потоку можливе зменшення ефективності вітровловлювання через недостатній тиск у вхідному перерізі. І навпаки, при надмірно високих швидкостях можуть зростати втрати тиску через вихрові утворення та локальні аеродинамічні ефекти, що підтверджують формули розрахунку коефіцієнта місцевого опору.

Порівняння результатів комп'ютерного моделювання (розділ 2) із даними експериментальних досліджень (розділ 3) підтвердило, що отримана формула для

розрахунку швидкості повітряного потоку узгоджується з чисельним аналізом. Це вказує на правильність застосованих методів оцінювання ефективності вітровловлювача та важливість урахування додаткових чинників, зокрема змін вітрових навантажень і локальних турбулентних ефектів.

4.2. Алгоритм обчислень основних гідродинамічних характеристик пасивної системи вентиляції із вітровловлювачем

Алгоритм обчислення гідродинамічних характеристик пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем ґрунтується на застосуванні рівняння Бернуллі для двох контрольних перерізів (перед вітровловлювачем та по осі припливної решітки) (рис. 4.1) з урахуванням втрат тиску, спричинених аеродинамічним опором, та може бути представлений у вигляді блок-схеми (рис. 4.2).

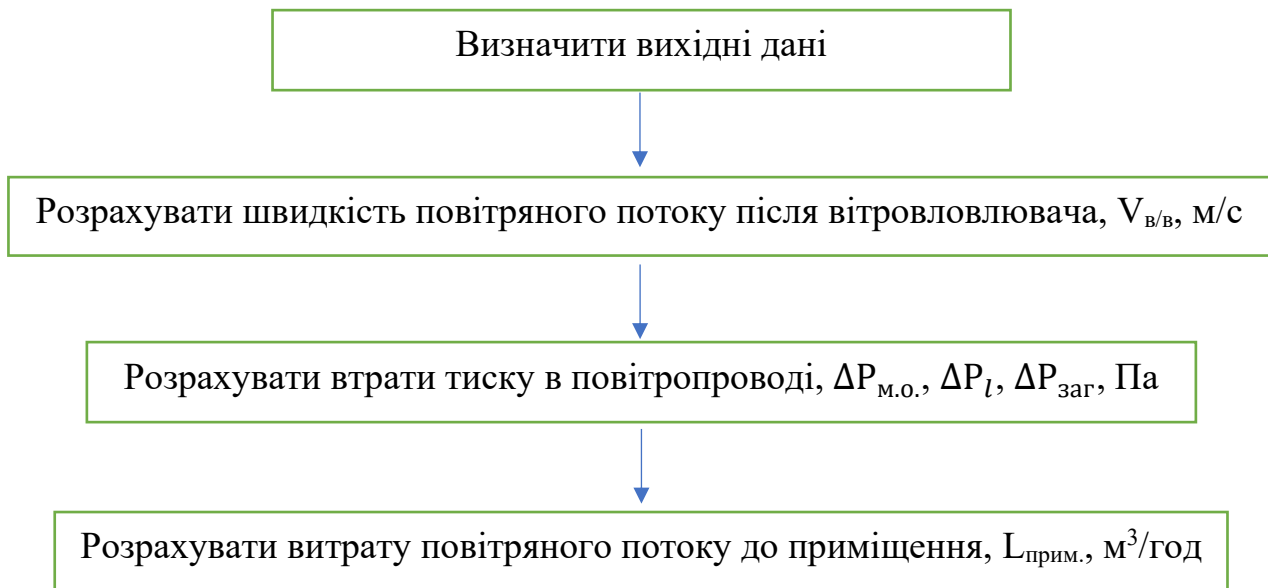


Рис. 4.2. Алгоритм обчислення основних гідродинамічних характеристик пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем

Вихідними даними для розрахунку є геометричні характеристики вітровловлювача; діаметр припливного повітропроводу; розміри приміщення;

необхідна кратність повітрообміну; аеродинамічні характеристики повітряного потоку (швидкість і кут набігаючого повітряного потоку); кліматологічні дані місця будівництва (середня за рік швидкість вітру; переважаючий напрямок вітру; частота зміни його напрямку; тиск, температура та вологість зовнішнього повітря).

У результаті розрахунку отримано витрату повітря, що надходить до приміщення.

Розрахунок здійснюється таким чином:

1. Розраховуємо швидкість повітряного потоку після вітровловлювача, $V_{в/в}$, м/с:

$$V_{в/в} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{\text{динам.2}}}{\rho}}.$$

2. Розраховуємо втрати тиску в повітропроводі:

а) на місцевих опорах:

$$\Delta P_{\text{м.о.}} = \sum \xi_i \cdot \frac{\rho \cdot V_{в/в}^2}{2};$$

б) по довжині:

$$\Delta P_l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot V_{в/в}^2}{2};$$

в) сумарні втрати тиску в повітропроводі:

$$\Delta P_{\text{заг}} = \Delta P_{\text{м.о.}} + \Delta P_l.$$

3. Розраховуємо витрату повітряного потоку, що надходить до приміщення, м³/год:

$$L_{\text{прим}} = 3600 \cdot F \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{\text{заг}}}{\rho}}.$$

4.3. Оцінювання ефективності роботи пасивної системи вентиляції для підтримання параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках

Для визначення ефективності роботи пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем в енергоощадних будинках доцільно використовувати логічну

послідовність розрахункових і аналітичних кроків. Такий алгоритм забезпечує об'єктивне оцінювання відповідності фактичної продуктивності вентиляції нормативним вимогам до мікроклімату та може бути представлений у вигляді блок-схеми (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Алгоритм визначення ефективності роботи пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем

Наведений алгоритм (рис. 4.3) відображає загальний порядок дій, необхідний для оцінювання ефективності пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем відповідно до встановлених мікрокліматичних вимог. При цьому основним параметром, що визначає роботу вітровловлювача, є його ефективність, яка характеризує здатність конструкції забезпечувати надходження припливного повітря в приміщення.

Ефективність визначається у такій послідовності:

1. Визначити нормативні параметри мікроклімату:
 - температура повітря в теплий період року, °C;

- об'єм приміщення, м³;
- призначення будинку;
- нормативна кратність повітрообміну.

2. Необхідна витрата повітря, $L_{\text{необх.}}$, м³/год визначається за формулою:

$$L_{\text{необх.}} = n \cdot V_{\text{прим}},$$

де n – кратність повітрообміну;

$V_{\text{прим}}$ – об'єм приміщення, м³.

3. За результатами експериментального дослідження (розділ 3) було отримано графічну залежність витрати вловленого вітровловлювачем повітря L , м³/год від швидкості набігаючого повітряного потоку V , м/с при різних кутах набігаючого потоку α (рис. 3.4). Отримані графічні залежності було апроксимовано та отримано емпіричні залежності визначення витрати вловленого вітровловлювачем повітря L при різних кутах набігаючого повітряного потоку α :

$$\text{для } \alpha = 0 \text{ градусів: } L = 33,065 \cdot V - 6,8422;$$

$$\text{для } \alpha = 11 \text{ градусів: } L = 31,856 \cdot V - 7,5649;$$

$$\text{для } \alpha = 22,5 \text{ градуси: } L = 31,186 \cdot V - 7,7814;$$

$$\text{для } \alpha = 34 \text{ градуси: } L = 32,185 \cdot V - 7,4742;$$

$$\text{для } \alpha = 45 \text{ градусів: } L = 33,065 \cdot V - 6,8422.$$

З урахуванням наведеної апроксимації витрати повітря залежно від швидкості повітряного потоку при різних кутах набігаючого потоку доцільно побудувати універсальну емпіричну модель витрати повітря, в якій коефіцієнти a , b , c залежать від кута набігаючого потоку:

$$L(V, \alpha) = (k_1 \cdot \alpha + k_2) \cdot V^2 + (k_3 \cdot \alpha + k_4) \cdot V + (k_5 \cdot \alpha + k_6).$$

Отже, універсальна залежність для визначення витрати вловленого вітровловлювачем повітря із урахуванням швидкості та кута набігаючого на вітровловлювач повітряного потоку набуде вигляду:

$$L(V, \alpha) = 2.91 \cdot V^2 + 3.86 \cdot V + 0.13 \cdot \alpha \cdot V - 0.36 \cdot \alpha + 69.23 ; \quad (4.25)$$

$$R^2 = 0,9881.$$

4. Коефіцієнт ефективності вітровловлювача, який враховує геометрію вітровловлювача та кут набігаючого повітряного потоку протягом року, розраховується за формулою:

$$k_{B/B} = \frac{L}{L_{max}}, \quad (4.26)$$

де L – розрахункова витрата вловленого вітровловлювачем повітря, $\text{м}^3/\text{год}$;

L_{max} – максимальна витрата набігаючого на вітровловлювач повітряного потоку, $\text{м}^3/\text{год}$.

Максимальна витрата набігаючого на вітровловлювач повітря розраховується за формулою, $\text{м}^3/\text{год}$:

$$L_{max} = V \cdot F_{\phi}, \quad (4.27)$$

де V – швидкість набігаючого на вітровловлювач повітряного потоку, $\text{м}/\text{с}$;

F_{ϕ} – фронтальна площа вітровловлювача, м^2 .

Фронтальна площа вітровловлювача визначалася на основі умови рівності витрати повітряного потоку до вітровловлювача та витрати вловленого вітровловлювачем повітря, з використанням експериментальних даних (табл. 3.3) та з урахуванням постійного діаметра повітропроводу (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Результати розрахунку фронтальної площі вітровловлювача

Кут набігаючого на вітровловлювач повітряного потоку, град	0	11	22,5	34	45
Фронтальна площа вітровловлювача, м^2	0,0090	0,0088	0,0087	0,0088	0,0090

Підставивши значення максимальної витрати набігаючого на вітровловлювач повітря до формули (4.26) отримаємо узагальнену формулу для розрахунку коефіцієнту ефективності вітровловлювача:

$$k_{B/B} = \frac{L}{V \cdot F_{\phi}}, \quad (4.28)$$

5. Оцінити відповідність фактичної витрати повітря, отриманої в результаті експериментальних досліджень, до встановлених нормативних вимог для житлових приміщень [73]:

$$L_{max} \geq L \geq L_{norm},$$

де L_{norm} – нормативне значення витрати повітря, м³/год що встановлюється згідно з кратністю повітрообміну для заданого типу приміщення.

У разі невиконання умови потрібно внести зміни в проєктні параметри вентиляційної системи (наприклад, змінити геометричні розміри вітровловлювача, діаметри повітропроводів, висоту розташування вітровловлювача та ін.)

Аналіз результатів експериментальних досліджень (табл. 3.3, рис. 3.4) свідчить, що витрата вловленого вітровловлювачем повітря істотно залежить від швидкості набігаючого повітряного потоку. Зі зростанням цієї швидкості спостерігається пропорційне підвищення об'єму повітря, що надходить у вентиляційну систему.

Наприклад, при зміні швидкості набігаючого повітряного потоку з 1,35 м/с до 2,70 м/с (при фіксованому куті набігаючого повітряного потоку 0°) витрата вловленого вітровловлювачем повітря збільшується з 46,16 м³/год до 92,33 м³/год. Таке зростання підтверджує високий рівень чутливості пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем до зміни зовнішніх вітрових умов.

Такий результат демонструє ефективність роботи вітровловлювача за умов зміни напрямку та швидкості руху повітря й доводить доцільність урахування середньорічної та сезонних швидкостей вітру під час проєктування вентиляційних систем з вітровловлювачем. Стабільне збільшення витрати повітря зі зростанням швидкості потоку забезпечує надійний приплив свіжого повітря та сприяє підтриманню належного мікроклімату в приміщеннях без застосування механічного вентиляційного обладнання.

4.4. Висновки до розділу 4

Розроблена методика гідродинамічного розрахунку пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем урахує ключові параметри, що впливають на рух повітря в системі (швидкість набігаючого потоку, аеродинамічний опір елементів системи вентиляції, гідростатичний тиск та ін.).

Алгоритм визначення гідродинамічних характеристик системи дозволяє поетапно здійснювати інженерні розрахунки із урахуванням втрат тиску у вітровловлювачі, повітропроводах, місцевих опорах та розподілу швидкостей у вентиляційних каналах. Урахування таких чинників сприяє точнішому прогнозуванню витрати повітря, що надходить у приміщення, без залучення механічного вентиляційного обладнання.

Запропонований підхід до оцінювання ефективності пасивної системи вентиляції з використанням вітровловлювача дозволяє комплексно враховувати як нормативні вимоги до параметрів мікроклімату, так і фактичні характеристики роботи системи в конкретних кліматичних умовах. Запропонований інженерний метод розрахунку системи вентиляції забезпечує можливість визначення необхідного повітрообміну, а також дозволяє своєчасно виявити потребу коригування проєктних параметрів. Застосування такого підходу сприяє підвищенню енергоефективності будівель і забезпеченню комфортного середовища без використання механічного вентиляційного обладнання.

Комплексне поєднання інженерного методу розрахунку та алгоритмічного підходу створює основу для створення ефективних проєктних рішень, орієнтованих на зниження енергоспоживання, підтримання стабільного мікроклімату в приміщеннях.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ВІТРОВЛОВЛЮВАЧІВ У СКЛАДІ ПАСИВНИХ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ

5.1. Схемні та принципові рішення використання вітровловлювачів у системах пасивної вентиляції енергоощадних будинків

Забезпечення ефективного повітрообміну в енергоощадних будинках є одним із ключових завдань сучасного будівництва, спрямованого на зниження споживання енергії при збереженні високих стандартів комфортності середовища. Одним із перспективних рішень є застосування пасивних вентиляційних систем, зокрема з використанням вітровловлювачів.

Вітровловлювачі виступають в ролі активних елементів природного повітрообміну, забезпечуючи надходження зовнішнього повітря завдяки використанню енергії вітру без залучення додаткових механічних засобів вентиляції. Системи такого типу дозволяють підтримувати оптимальні параметри мікроклімату з мінімальними витратами енергії, що є вкрай актуальним для реалізації концепцій «нульового енергоспоживання» в сучасних будинках.

Основними принципами побудови схемних рішень систем пасивної вентиляції з використанням вітровловлювачів є:

- правильне орієнтування вітровловлювачів відносно переважаючих напрямків вітру;
- забезпечення необхідного перепаду тиску між зовнішнім середовищем і внутрішнім об'ємом будівлі;
- гнучкість роботи системи в умовах змінного напрямку та/або швидкості вітру;
- під'єднання вітровловлювачів до наявних вентиляційних каналів без необхідності кардинальної перебудови будівельних конструкцій.

Для реалізації запропонованих технічних рішень пасивної системи вентиляції рекомендується розташовувати вітровловлювач на верхніх конструктивних

елементах будівлі для максимально ефективного використання вітрової енергії. Уловлене вітровловлювачем повітря надходить до споживачів через вертикальні вентиляційні канали, організовані з урахуванням мінімізації втрат тиску (рис. 5.1).

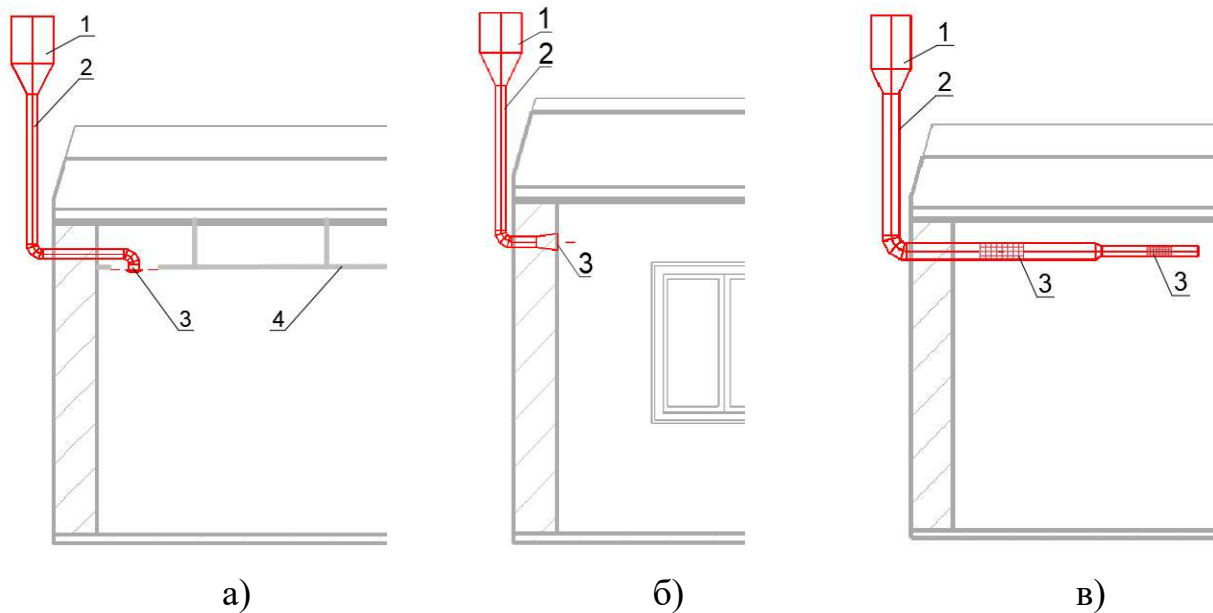


Рис. 5.1. Принципова схема організації пасивної вентиляції з вітровловлювачем в енергоощадному будинку: а – з подачею повітря через припливну решітку під підвісною стелею; б – з подачею повітря через припливну решітку у стіні; в – з подачею повітря через вентиляційний канал з припливними решітками; 1 – вітровловлювач; 2 – вентиляційний канал; 3 – припливна решітка; 4 – підвісна стеля

Крім нових будівель, існує можливість інтеграції вітровловлювачів у вже експлуатовані об'єкти за рахунок модернізації наявних вентиляційних систем (рис. 5.2).

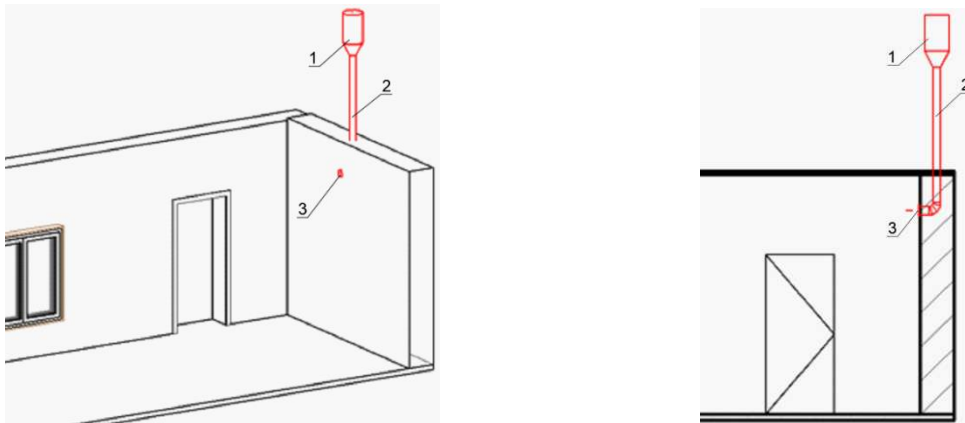


Рис. 5.2. Підключення вітровловлювача до наявної системи природної вентиляції: 1 – вітровловлювач; 2 – вентиляційний канал; 3 – припливна решітка

Розроблення та впровадження принципових схем пасивної вентиляції з вітровловлювачами дозволяє значно підвищити енергоощадність будинків, забезпечити стабільний і керований повітрообмін та сприяти підвищенню загального рівня комфорту без істотних витрат на енергоресурси.

5.2. Результати розрахунку економічної доцільності використання вітровловлювачів для пасивних систем вентиляції в енергоощадних будинках

Для оцінювання економічної доцільності впровадження вітровловлювачів у пасивні системи вентиляції енергоощадних будівель доцільно використовувати стандартний підхід до техніко-економічного аналізу, який передбачає визначення поточних витрат на електроенергію, оцінювання витрат на встановлення вітровловлювача, розрахунок економії від зменшення споживання енергії, терміну окупності, а також чистого економічного ефекту за обраний період експлуатації.

Алгоритм розрахунку економічної доцільності впровадження вітровловлювачів передбачає визначення ключових економічних показників [177–181].

1. Поточні витрати на механічну вентиляцію (без вітровловлювача) розраховують за формулою:

$$C_{\text{мех}} = P_{\text{вент}} \cdot t_{\text{рік}} \cdot T \cdot C_{\text{ел}}, \text{ грн/рік}, \quad (5.1)$$

де $C_{\text{мех}}$ – щорічні витрати на електроенергію для роботи механічної вентиляції;

$P_{\text{вент}}$ – потужність вентилятора, $P_{\text{вент}} = 0,4$ кВт;

$t_{\text{рік}}$ – середня кількість годин роботи вентиляції на добу, $t_{\text{рік}} = 12$ год/добу;

T – кількість діб роботи на рік, $T = 300$ діб;

$C_{\text{ел}}$ – тариф на електроенергію, $C_{\text{ел}} = 4,32$ грн/кВт·год;

$$C_{\text{мех}} = 0,4 \cdot 12 \cdot 300 \cdot 4,32 = 6220,8 \text{ грн/рік}.$$

2. Витрати на встановлення вітровловлювача:

$$C_{\text{вв}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{монтаж}} + C_{\text{проект}}, \text{ грн}, \quad (5.2)$$

де $C_{\text{вв}}$ – загальна вартість упровадження вітровловлювача, грн;

$C_{\text{мат}}$ – вартість матеріалів і самого вітровловлювача, $C_{\text{мат}} = 10\,000$ грн;

$C_{\text{монтаж}}$ – витрати на монтажні роботи (з урахуванням висотних робіт), $C_{\text{монтаж}} = 3000$ грн;

$C_{\text{проект}}$ – витрати на проектні та супровідні роботи, $C_{\text{проект}} = 2000$ грн;

$$C_{\text{вв}} = 10000 + 3000 + 2000 = 15000 \text{ грн}.$$

3. Оцінювання річної економії на електроенергію після впровадження вітровловлювача:

$$E_{\text{ек}} = C_{\text{мех}} - C_{\text{залиш}}, \text{ грн/рік}, \quad (5.3)$$

де $C_{\text{залиш}}$ – залишкові витрати на вентиляцію (перевірка стану, очищення), $C_{\text{залиш}} = 500$ грн/рік;

$$E_{\text{ек}} = 6220,8 - 500 = 5720,8 \text{ грн/рік}.$$

4. Термін окупності розраховуємо за формулою:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{C_{\text{вв}}}{E_{\text{ек}}}, \text{ роки}. \quad (5.4)$$

$$T_{\text{окуп}} = \frac{15000}{5720,8} = 2,62 \text{ роки}.$$

5. Оцінювання загального економічного ефекту за весь термін служби:

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{ек}} \cdot N - C_{\text{вв}}, \text{ грн}, \quad (5.5)$$

де N – кількість років експлуатації вітровловлювача, що обирається залежно від прийнятого або запланованого терміну експлуатації вітровловлювача (приймаємо 20 років);

$$E_{\text{заг}} = 5720,8 \cdot 20 - 15000 = 99416 \text{ грн.}$$

**Примітка: у розрахунках інфляція та дисконт не враховувалися.*

5.3. Оцінка можливості підвищення класу енергоспоживання будинків від упровадження запропонованих технічних рішень

У сучасному енергоефективному будівництві особливу увагу приділяють мінімізації експлуатаційних витрат і зниженню енергоспоживання без шкоди для мікроклімату внутрішнього середовища. Одним із ефективних засобів реалізації цих завдань є впровадження пасивних систем вентиляції, у яких ключову роль відіграє вітровловлювач. Його конструкція дозволяє використовувати потенціал природної енергії вітру для створення стабільного повітрообміну без застосування механічного нагнітання чи кондиціювання.

Принципові рішення щодо використання вітровловлювачів базуються на чіткому розумінні аеродинамічних характеристик об'єкта будівництва, рози вітрів для конкретного регіону, а також особливостей організації внутрішнього повітряного середовища. Основною метою є забезпечення постійного та спрямованого припливу зовнішнього свіжого повітря в приміщення, що досягається за рахунок різниці тисків, яка утворюється між навітряною й підвітряною сторонами будинку.

У типових схемних рішеннях вітровловлювач установлюється в зоні з максимально можливим вітровим навантаженням, на даху або фасаді верхніх поверхів. Положення вітровловлювача обирається з урахуванням переважаючих напрямків вітру, висоти будівлі та можливості прямого сполучення з вентиляційними каналами. Вхідні отвори вітровловлювача обладнано жалюзі, які

відкриваються під впливом повітряного тиску, забезпечуючи направлений потік без зворотної тяги.

У загальноприйнятій схемі пасивної вентиляції з вітровловлювачем припливне повітря подається до житлових приміщень, а відпрацьоване повітря видаляється через витяжні канали, розташовані у вологих або забруднених зонах (кухні, санвузли, комори). Таке функціональне розділення повітряного середовища забезпечує динамічну вентиляцію, яка відповідає санітарно-гігієнічним нормам без додаткових енергетичних затрат.

Принципові креслення систем можуть включати кілька модифікацій:

- одноканальні схеми: один вітровловлювач обслуговує одне приміщення або вертикальну секцію, обслуговуючи декілька приміщень, розташованих одне над одним;
- багатоканальні схеми: поєднання кількох вітровловлювачів, які забезпечують розподілення повітря по поверхах;
- комбіновані системи: вітровловлювач поєднується з витяжним дефлектором для підсилення природної тяги.

Особлива увага приділяється зниженню втрат тепла, які можуть виникати при надходженні холодного повітря в опалювані приміщення. Для цього в природній системі вентиляції можна передбачити використання повітряних шлюзів, які здатні стабілізувати повітряний потік, знижуючи перепади тиску у разі різкої зміни зовнішніх погодних умов, теплоізольованих каналів, а також інтеграції з тепловими масами (будівельні конструкції, здатні акумулювати й повільно віддавати/відбирати тепло) для оптимізації мікроклімату в приміщенні.

Такі схемні рішення не лише дозволяють організувати стабільний повітрообмін, а й формують умови для зменшення навантаження на механічні системи, зниження вуглецевого сліду будівлі та підвищення загального рівня енергоефективності. Інтеграція вітровловлювачів доцільна як у новому будівництві, так і в проєктах термомодернізації наявних будинків, де збереження

природного повітрообміну має вирішальне значення для довгострокової експлуатаційної ефективності.

Отже, схемні та принципові рішення, що базуються на використанні вітровловлювачів, відіграють ключову роль у побудові екологічно збалансованих і ресурсоощадних вентиляційних систем майбутнього.

5.4. Висновки до розділу 5

Результати розрахунку економічної доцільності використання вітровловлювачів для пасивних систем вентиляції в енергоощадних будинках демонструють позитивну динаміку окупності та ефективності інвестицій. Основні висновки, отримані на основі аналізу економічних показників, включають такі аспекти:

- використання вітровловлювачів дозволяє значно знизити енергоспоживання, пов'язане з роботою механічних систем вентиляції, що особливо важливо в умовах зростання тарифів на електроенергію. Економія досягається завдяки повній або частковій відмові від вентиляторів, кондиціонерів і повітрообмінних установок у режимах природної вентиляції;

- розрахунки показали, що при середньому терміні служби вітровловлювача 20 років його встановлення дозволяє зменшити витрати на вентиляцію до 6000 грн щорічно. Це забезпечує термін окупності в межах 2 - 4 роки залежно від обсягу вентиляційного навантаження, кліматичних умов регіону, типу будівлі та рівня інтеграції з іншими енергоефективними рішеннями (наприклад, рекуперацією тепла або сонячними колекторами);

- окрім прямої економії, варто також урахувати додаткові вигоди-покращення мікроклімату, зменшення зношування механічних компонентів систем вентиляції та зниження шумового навантаження в приміщеннях;

- варто зазначити, що в новобудовах або будівлях після термомодернізації інтеграція вітровловлювачів може бути врахована ще на стадії проектування, що

дозволяє знизити витрати на інженерні системи та зменшити загальну вартість експлуатації будівлі в довгостроковій перспективі.

Отже, економічна доцільність використання вітровловлювачів підтверджується як коротко-, так і довгостроковими показниками ефективності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У роботі вирішено актуальну задачу підвищення ефективності функціонування пасивних систем вентиляції для енергоощадних будинків за рахунок впровадження вітровловлювачів.

2. Аналіз літературних джерел показав, що більшість традиційних вентиляційних рішень не враховують змінні кліматичні фактори, мають високі енерговитрати та потребують додаткового технічного обслуговування. Тоді як пасивні системи вентиляції з вітровловлювачем виявились перспективними у контексті сталого будівництва, однак недостатньо вивченими залишались гідродинамічні характеристики вітровловлювачів як їх функціонального елемента.

3. Розроблено комп'ютерні моделі процесу повітровловлювання в широкому діапазоні швидкостей вітрового потоку, що дало можливість зробити оцінку гідродинамічних характеристик запропонованої конструкції вітровловлювача.

4. Проведено комп'ютерне моделювання роботи системи пасивної вентиляції із застосуванням вітровловлювача, що дало змогу провести імітаційне моделювання організації повітрообміну та стратифікації параметрів мікроклімату в приміщенні енергоощадного будинку для різних кліматичних умов.

5. Розроблено фізичну модель вітровловлювача. Проведені на цій моделі експериментальні дослідження дали можливість отримати універсальну залежність для визначення витрати вловленого вітровловлювачем повітря із урахуванням швидкості та кута набігаючого на вітровловлювач повітряного потоку. Встановлено, що коефіцієнт корисної дії вітровловлювача знаходиться в межах від 86,1 до 94,4%.

6. Проведені експериментальні дослідження впливу гідродинамічних характеристик вітровловлювача пасивної системи вентиляції на витрату повітря, що надходить у приміщення, підтвердили здатність вітровловлювача забезпечити нормативний повітрообмін при швидкостях набігаючого повітряного потоку від 0,4 м/с. Результати експериментальних досліджень збіглися з комп'ютерним

моделюванням роботи пасивної системи вентиляції енергоощадного будинку, що підтверджується коефіцієнтом кореляції 0,97 та розбіжністю, яка не перевищує 8%. Така збіжність результатів свідчить про те, що метод моделювання може бути ефективно застосований для прогнозування гідродинамічних характеристик вітровловлювача ще на етапах його проектування.

7. Отримано універсальну залежність для визначення витрати вловленого вітровловлювачем повітря із урахуванням швидкості та кута набігаючого на вітровловлювач повітряного потоку.

8. Отримано розрахункову залежність для визначення коефіцієнта місцевого опору вітровловлювача. Результати досліджень показали, що величина коефіцієнта опору є сталою та не залежить від швидкості та кута набігаючого на вітровловлювач повітряного потоку. Це дозволяє використовувати отримане значення коефіцієнта опору як універсальну характеристику конструкції вітровловлювача для подальших інженерних розрахунків систем пасивної вентиляції.

9. Удосконалено узагальнену методику інженерного розрахунку пасивних систем вентиляції з вітровловлювачем на основі фізичного та комп'ютерного моделювання, що зробило можливим урахувати реальні умови експлуатації при визначенні необхідного повітрообміну в приміщеннях.

10. Розроблено алгоритм визначення ефективності роботи пасивної системи вентиляції з вітровловлювачем, який відображає загальний порядок дій, необхідний для комплексного оцінювання ефективності роботи пасивної системи вентиляції енергоощадних будинків із застосуванням вітровловлювачів відповідно до встановлених мікрокліматичних вимог.

11. Оцінка економічної доцільності підтвердила, що впровадження вітровловлювачів дозволяє знизити витрати на вентиляцію в середньому до 6000 грн на рік при терміні окупності 2 – 4 роки. Доведено, що економічна доцільність використання вітровловлювачів підтверджується як коротко-, так і довгостроковими показниками ефективності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Указ Президента України «Про Стратегію сталого розвитку «Україна - 2020»» від 12.01.2015 №5/2015. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/5/2015>. – дата звернення 14.07.2025.
2. Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C. (2008) A review on buildings energy consumption information. Energy and Buildings. 40 (3), 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>.
3. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель у частині збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії та затвердження Національного плану збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії» від 29 січня 2020 р. № 88-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/88-2020-%D1%80#Text>. – дата звернення 14.07.2025.
4. ДБН В.2.6-31:2021 (2022). Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Чинний від 01.09.2022. Київ: Мінрегіонбуд України. 23 с.
5. ДСТУ Б А.2.2-8:2010 (2010). Розділ «Енергоефективність» у складі проектної документації об'єктів. Чинний від 01.07.2010. Київ: Мінрегіонбуд України. 52 с.
6. ДБН В.1.2-11:2021 (2022). Основні вимоги до будівель і споруд. Енергозбереження та енергоефективність. Чинний від 01.09.2022. Київ: Мінрегіон України. 21 с.
7. Krarti, M. (2018) Optimal design and retrofit of energy efficient buildings, communities, and urban centers. Kidlington: Butterworth-Heinemann, 625. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-02074-0>.
8. Саницький, М.А., Позняк, О.Р., Марущак, У.Д. (2013). Енергозберігаючі технології в будівництві: навч. посібник. Львів: Львівська політехніка, 240.

9. ДСТУ-Н Б А.2.2-13:2015 (2015). Енергетична ефективність будівель. Настанова з проведення енергетичної оцінки будівель. Чинний від 01.01.2016. Київ: Мінрегіон України, 29.
10. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» від 17.10.2019 р. № 199-IX (із змінами). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>. – дата звернення 14.07.2025.
11. ДСТУ Б В.2.2-21:2008 (209). Будинки і споруди. Метод визначення питомих тепловитрат на опалення будинків. Чинний від 01.06.2009. Київ: Мінрегіонбуд України. 24 с.
12. Наказ «Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель» від 11.07.2018 р. № 169 (2018). Чинний від 12.09.2023. Київ: Мінрегіонбуд України.
13. Еко-обігрів. Які є види енергоефективних будинків. URL: <https://ecobogrev.com/ua/a232676-yaki-vidi-energoefektivnih.html>. – дата звернення 14.07.2025.
14. Lai, F., et al. (2023). Green building technologies in Southeast Asia: A review. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 55, 102946. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102946>.
15. Ates, E., Karaarslan, N. (2024). Investigation of Hybrid Renewable Energy Green House for Reducing Residential Carbon Emissions. International Journal of Thermofluids, 21, 100558. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100558>.
16. Білотіл, В.Ю. (2022). Основні теоретичні засади, сучасний стан розвитку та тенденції формування «зеленого» будівництва в Україні в контексті сталого розвитку, 1, 63-73. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2022.255225>.
17. Чала, В.С, Орловська, Ю.В., Глущенко А.В. (2023). Європейські практики інвестування зеленого будівництва: підручник. Дніпро: ПДАБА, 148 с.
18. Кривенко, О.В. (2019). Огляд розвитку стандартів оцінювання «зеленого» будівництва у світі. Містобудування та територіальне планування. Київ: КНУБА, 71, 216–225. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2019.71.216-225>.

19. Данилюк, М.М., Дмитришин, М.В. (2020). Зелене будівництво у досягненні сталого регіональному розвитку. The actual problems of regional economy development, 1(16), 153–162. <https://doi.org/10.15330/apred.1.16.153-162>.
20. Дребот, О.І., Височанська, М.Я., Білотіл, В.Ю. (2021). Переваги та перспективи сталого розвитку в контексті зеленого будівництва. The modern trends in the development of business social responsibility: V International scientific conference. Baltija Publishing, 2021, 116. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-107-7-15>.
21. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року» від 29 грудня 2021 р. № 1803-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-%D1%80#Text>. – дата звернення 14.07.2025.
22. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Деякі питання стратегічного розвитку енергетичної ефективності будівель» від 29 грудня 2023 р. № 1228-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1228-2023-%D1%80#Text>. – дата звернення 14.07.2025.
23. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» від 17.10.2019 р. № 199-IX (із змінами). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>. – дата звернення 14.07.2025.
24. Директива 2002/91/ЄС Європейського Парламенту і Ради від 16 грудня 2002 року про енергетичну ефективність будівель. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2002/91/oj/eng>. – дата звернення 14.07.2025.
25. Директива Європейського Парламенту і Ради 2010/31/ЄС від 19 травня 2010 року про енергетичні характеристики будівель. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011-10#Text. – дата звернення 14.07.2025.
26. Passive house-igua. Українська ініціативна група пасивного будинку. URL: <https://passivehouse-igua.com/passive-house/passive-house-standard/>. – дата звернення 14.07.2025.

27. Harvey, L.D.D. (2013). Recent Advances in Sustainable Buildings: Review of the Energy and Cost Performance of the State-of-the-Art Best Practices from Around the World. *Annual Review of Environment and Resources*, 38(1), 281–309. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-070312-101940>.
28. Feist, W. (2001). *Gestaltungsgrundlagen Passivhäuser: Prinzip Wärmeschutz, wärmebrückenfreies Konstruieren, Luftdichtheit, Sonnenenergie, Lüftung, Heizwärme, Warmwasser, Trinkwasser, Stromeffizienz Erfahrungen, Kosten Nachweis, Beispiele*. Darmstadt: Verl. Das Beispiel, 144.
29. Passive House Institute, Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard (2016). Passive House Institute. URL: https://passipedia.org/_media/picopen/9f_160815_phi_building_criteria_en.pdf. – дата звернення 14.07.2025.
30. Schnieders, J., Feist, W., Rongen, L. (2015). Passive Houses for different climate zones. *Energy and Buildings*, 105, 71–87. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.032>.
31. Anand, V., Kadiri, V.L., Putcha, C. (2023). Passive buildings: a state-of-the-art review. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 4 (1), 3. <https://doi.org/10.1186/s43065-022-00068-z>.
32. National Institute of Building Sciences. A common definition for zero energy buildings (2015). URL: <https://www.energy.gov/eere/buildings/articles/common-definition-zero-energy-buildings>. – дата звернення 14.07.2025.
33. Kibert, C.J., Fard, M.M. (2012). Differentiating among low-energy, low-carbon and net-zero-energy building strategies for policy formulation». *Building Research & Information*, 40 (5), 625–637. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.703489>.
34. Kosonen, A., Keskisaari, A. (2020). Zero-energy log house - Future concept for an energy efficient building in the Nordic conditions. *Energy and Buildings*, 228, 110449. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110449>.

35. Tommerup, H., Rose, J., Svendsen, S. (2007). Energy-efficient houses built according to the energy performance requirements introduced in Denmark in 2006. *Energy and Buildings*, 39(10), 1123-1130. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.12.011>.
36. Noaman, D.S., El-Ghafour, S.A. (2024). Holistic design of energy-efficient temporary houses: Meeting ventilation, heating, cooling, and lighting demands. *Journal of Building Engineering*, 86, 108534. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108534>.
37. Zhang, W., Deng, M., Xiong, Q. (2024). Evaluation of energy performance in positive energy building: X HOUSE at Solar Decathlon Middle East 2021. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 114163. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114163>.
38. Franchini, G., Brumana, G., Perdichizzi, A. (2019). Monitored performance of the first energy+ autonomous building in Dubai. *Energy and Buildings*, 205, 109545. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109545>.
39. Hawila, A.A.W., Perneti, R., Pozza, C., Belleri, A. (2022). Plus energy building: Operational definition and assessment. *Energ. Build.*, 265, 112069. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112069>.
40. Ala-Juusela, M., H. ur Rehman (2020). PEB as enabler for consumer centred clean energy transition- shared definition and concept. EXCESS – FleXible User-Centric Energy Positive Houses. URL: https://positive-energy-buildings.eu/fileadmin/user_upload/Resources/EXCESS_D1.3_29_10.pdf. – дата звернення 14.07.2025.
41. Эрнст Т. Пассивный экодом. Архитектура и экология. URL: http://www.ernst.kiev.ua/Passiv_ru.html. – дата звернення 14.07.2025.
42. The Passive House Institute (PHI). The Passive House Institute (PHI). URL: <http://www.passiv.de>. – дата звернення 14.07.2025.
43. Welch, S., Obonyo, E., Memari, A.M. (2023). A review of the previous and current challenges of passive house retrofits. *Building and Environment*, 245, 10938. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110938>.

44. Janssens, B., Verbruggen, A. (2014). Feasibility of upgrading the energy performance of recent massive brick houses. *Frontiers of Architectural Research*, 3 (1), 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2013.11.004>.
45. Piccardo, C., Dodoo, A., Gustavsson, L. (2020). Retrofitting a building to passive house level: A life cycle carbon balance. *Energy and Buildings*, 223, 10135. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110135>.
46. V., Nyberg. Archdaily. URL: <https://www.archdaily.com/66545/villa-nyberg-kjellgren-kaminsky-architecture>. – дата звернення 14.07.2025.
47. Kerchum Residence. Archdaily. URL: <https://www.archdaily.com/131357/kerchum-residence-frits-de-vries-architect>. – дата звернення 14.07.2025.
48. Эрнст, Т. Дом солнца. Архитектура и экология. URL: www.ernst.kiev.ua/Passiv-Haus_ru.html. – дата звернення 14.07.2025.
49. Мілейковський, В.О., Котелков, Л.М. (2018). Вентиляція індивідуального житлового будинку: навч. посібник. Дніпро: Середняк Т. К., 156. ISBN 978-617-7599-61-5.
50. Harkouss, F., Fardoun, F., Biwole, P.H. (2019). Optimal design of renewable energy solution sets for net zero energy buildings. *Energy*, 179, 155–1175. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.013>.
51. Marino, C. et al. (2019). Towards the nearly zero and the plus energy building: Primary energy balances and economic evaluations. *Thermal Science and Engineering Progress*, 13, 100400. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100400>.
52. Foley, A., Olabi, A.G. (2017). Renewable energy technology developments, trends and policy implications that can underpin the drive for global climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 1112–1114. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.065>.
53. Mathiesen, B.V., et al. (2012). The interaction between intermittent renewable energy and the electricity, heating and transport sectors. *Energy*, 48 (1), 2–4. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.001>.

54. Lorestani, A., Ardehali, M.M. (2018). Optimization of autonomous combined heat and power system including PVT, WT, storages, and electric heat utilizing novel evolutionary particle swarm optimization algorithm. *Renewable Energy*, 119, 490–503. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.037>.
55. Gonçalves Da Silva, C. (2010). Renewable energies: Choosing the best options. *Energy*, 35 (8), 3179–3193. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.061>.
56. Ellabban, O., Abu-Rub, H., Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748–764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>.
57. Parida, B., Iniyar, S., Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (3), 625–1636. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032>.
58. Kristiansen, A.B., Ma, T., Wang, R.Z. (2019). Perspectives on industrialized transportable solar powered zero energy buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108, 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.032>.
59. Corti, P., et al. (2020). Comparative Analysis of BIPV Solutions to Define Energy and Cost-Effectiveness in a Case Study. *Energies*, 13 (15), 3827. <https://doi.org/10.3390/en13153827>.
60. Loganathan, B., et al. (2019). Design of a micro wind turbine and its economic feasibility study for residential power generation in built-up areas. *Energy Procedia*, 160, 812–819. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.153>.
61. Cannistraro, M., Mainardi, E. and Bottarelli, M. (2018). Testing a dual-source heat pump. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 5 (3), 205–210. <https://doi.org/10.18280/mmep.050311>.
62. Chel, A., Janssens, A., De Paepe, M. (2015). Thermal performance of a nearly zero energy passive house integrated with the air–air heat exchanger and the earth–water heat exchanger. *Energy and Buildings*, 96, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.058>.

63. Wang, L., et al. (2019). Experimental investigations on a heat pump system for ventilation heat recovery of a novel dual-cylinder rotary compressor. *International Journal of Refrigeration*, 108, 6–36. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.08.021>.
64. Пуховий, І. І, Гандусь, М. С, Хруленко, О. О. (2015). Сонячне опалення типу «Стіна Тромба-Мішеля» з розширеною буферною зоною і прозорою стелею при роботі без традиційного опалення реального будинку, 1, 32–37. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2015_1_8.
65. Мілейковський, В. О., Клименко, Г.М., Дзюбенко, В.Г. (2017). Ефективність організації повітрообміну приміщень при використанні стін Тромба-Мішеля, 21, 18-26. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/votp_2017_21_6.
66. Ding, D. (2024). Design strategies of passive solar greenhouses: A bibliometric and systematic review. *Ain Shams Engineering Journal*, 15 (5), 102680. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102680>.
67. Mishra, K., Stanghellini, C., Hemming, S. (2023). Technology and Materials for Passive Manipulation of the Solar Spectrum in Greenhouses. *Advanced Sustainable Systems*, 7 (5), 2200503. <https://doi.org/10.1002/adsu.202200503>.
68. Tong, G., Chen, Q., Xu, H. (2022). Passive solar energy utilization: A review of envelope material selection for Chinese solar greenhouses. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101833. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101833>.
69. Savin, V., Kirichenko, P. (2024). Efficient use of ground heat exchangers in energy-saving ventilation. *Journal of Kryvyi Rih National University*, 22(1), 83-88. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2024-1-58-83-89>.
70. Basok, B.I., Novitska, M.P. (2017). Теплофізичне моделювання повітряно-грунтового теплообмінника для теплової завіси фасадних стін експериментального енергоефективного будинку. *Industrial Heat Engineering*, 39 (1), 49–52. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2017.07>.
71. Cekinir, S., Ozgener, L. (2024). A review of earth contact heating/cooling systems and a comparison of ground source heat pumps and earth air heat exchangers. *Solar Compass*, 9, 100067. <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2024.100067>.

72. Moghtader Gilvaei, Z., Haghighi Poshtiri, A., Mirzazade Akbarpoor, A. (2022). A novel passive system for providing natural ventilation and passive cooling: Evaluating thermal comfort and building energy. *Renewable Energy*, 198, 463–483. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.151>.
73. ДБН В.2.5-67:2013 (2013). Опалення, вентиляція та кондиціонування. Чинний від 01.01.2014. Київ: Мінрегіон України, 141.
74. Savin, V. et al. (2023). Recuperators as an important element for energy efficiency in building ventilation systems. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, 12 (2023.12), 71–78. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2023.12.08>.
75. Kirichenko, P., Savin, V. (2023). Recuperators as a way to improve the efficiency of systems mechanical ventilation systems in terms of energy saving in buildings. *Journal of Kryvyi Rih National University*, 21 (1), 104-109. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-104-109>.
76. Ghalam, N.Z., Farrokhzad, M., Nazif, H. (2021). Investigation of optimal natural ventilation in residential complexes design for temperate and humid climates. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 27, 100500. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100500>.
77. Патент України на корисну модель № 157606 UA МПК F24F 7/00 (2024.01). Вітровловлювач/ В.В. Савін, В.М. Желих. 2024. № 45; заявл. 07.02.2024; опубл. 06.11.2024, бюл. № 45. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1826059/>
78. Патент України на корисну модель № 157227 UA МПК F24F 7/00 (2024.01). Вітровловлювач/ В.В. Савін, В.М. Желих. 2024. № 38; заявл. 12.03.2024; опубл. 18.09.2024, бюл. № 38. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1818459/>.
79. Chenari, B., Dias Carrilho, J., Gameiro Da Silva, M. (2016). Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1426–1447. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.074>.

80. Foruzanmehr, A. (2015). People's perception of the loggia: A vernacular passive cooling system in Iranian architecture. *Sustainable Cities and Society*, 19, 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.002>.
81. Боженко М. Ф. (2019). Системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря будівель: навч. посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 380. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30248?locale=uk>. – дата звернення 12.07.2025.
82. ДСТУ Б EN 15251:2011 (2012). Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики. Чинний від 01.07.2013. Київ: Мінрегіонбуд України, 71.
83. Пономарчук, І. А., Колесник, К. В. (2017) Опалення: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 132. URL: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2022/Ponomarchuk_2017_125.pdf. - дата звернення 10.04.2025.
84. Feist, W. et al. (2005) Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. *Energy and Buildings*, 37 (11), 1186–1203. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.020>.
85. Савченко, О.О., Щербатюк, Б. І. (2014) Електричне опалення будівель: навч. посібник. Львів: Львівська політехніка, 160.
86. Cvetković, D., Nešović, A. (2021) Impact of heat source at radiant electric heating panel. *Energy and Buildings*, 239, 110843. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110843>.
87. Wang, G., Zhang, Z., Lin, J. (2024). Multi-energy complementary power systems based on solar energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114464. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114464>.
88. Diaz De Garayo, S., et al. (2021). Prototype of an air to air thermoelectric heat pump integrated with a double flux mechanical ventilation system for passive houses. *Applied Thermal Engineering*, 190, 116801. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116801>.

89. Liu, S., et al. (2024). Review on heat pump energy recovery technologies and their integrated systems for building ventilation. *Building and Environment*, 248, 111067. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111067>.
90. Liu, Z., et al. (2019). Review of energy conservation technologies for fresh air supply in zero energy buildings. *Applied Thermal Engineering*, 148, 544–556. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.085>.
91. Nejat, P., et al. (2024). The Windcatcher: A Renewable-Energy-Powered Device for Natural Ventilation-The Impact of Upper Wing Walls. *Energies*, 17 (3), p. 611. <https://doi.org/10.3390/en17030611>.
92. Nicol, F. and Wilson, M. (2004). The effect of street dimensions and traffic density on the noise level and natural ventilation potential in urban canyons. *Energy and Buildings*, 36(5), 423–434. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.051>.
93. Dehghani-sani, A.R., Soltani, M., Raahemifar, K. (2015). A new design of wind tower for passive ventilation in buildings to reduce energy consumption in windy regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 182–195. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.018>.
94. Желих, В.М., Савін, В.В. (2023). Особливості використання вітровловлювачів у системах енергоощадної вентиляції. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Науково-технічний збірник. Випуск 47. Київ: КНУБА, 53 с. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.47.53-62>.
95. Cedeno Laurent, J.G., Samuelson, H.W., Chen, Y. (2017). The impact of window opening and other occupant behavior on simulated energy performance in residence halls. *Building Simulation*, 10(6), 963–976. <https://doi.org/10.1007/s12273-017-0399-3>.
96. Schulze, T., Eicker, U. (2013). Controlled natural ventilation for energy efficient buildings. *Energy and Buildings*, 56, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.044>.

97. Chen, Y., Tong, Z., Malkawi, A. (2017). Investigating natural ventilation potentials across the globe: Regional and climatic variations/ *Building and Environment*, 122, 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.026>.
98. Tong, Z., Chen, Y., Malkawi, A., Liu, Z., et al. (2016). Energy saving potential of natural ventilation in China: The impact of ambient air pollution/ *Applied Energy*, 179, pp. 660–668. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.019>.
99. Hiyama, K., Glicksman, L. (2015). Preliminary design method for naturally ventilated buildings using target air change rate and natural ventilation potential maps in the United States. *Energy*, 89, 655–666. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.026>.
100. Oropeza-Perez, I., Østergaard, P.A. (2014). Energy saving potential of utilizing natural ventilation under warm conditions – A case study of Mexico. *Applied Energy*, 130, 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.035>.
101. Chen, X., Yang, H., Wang, Y. (2017). Parametric study of passive design strategies for high-rise residential buildings in hot and humid climates: miscellaneous impact factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 442–460. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.055>.
102. He, X. et al. (2018). Energy consumption and well-to-wheels air pollutant emissions of battery electric buses under complex operating conditions and implications on fleet electrification. *Journal of Cleaner Production*, 171, 714–722. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.017>.
103. Tong, S. et al. (2018). Developing a grid-connected power optimization strategy for the integration of wind power with low-temperature adiabatic compressed air energy storage. *Renewable Energy*, 125, pp. 73–86. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.067>.
104. Etheridge, D. (2015). A perspective on fifty years of natural ventilation research. *Building and Environment*, 91, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.033>.

105. Tong, Z., Chen, Y., Malkawi, A. (2017). Estimating natural ventilation potential for high-rise buildings considering boundary layer meteorology. *Applied Energy*, 193, 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.041>.
106. Ghiaus, C. et al. (2006). Urban environment influence on natural ventilation potential. *Building and Environment*, 41(4), 395–406. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.003>.
107. Tong, Z., Chen, Y., Malkawi, A. (2016). Defining the Influence Region in neighborhood-scale CFD simulations for natural ventilation design. *Applied Energy*, 182, 625–633. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.098>.
108. Malkawi, A. et al. (2016). Predicting thermal and energy performance of mixed-mode ventilation using an integrated simulation approach. *Building Simulation*, 9(3), 335–346. <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0271-x>.
109. Wu, W. et al. (2012). Evaluation of methods for determining air exchange rate in a naturally ventilated dairy cattle building with large openings using computational fluid dynamics (CFD). *Atmospheric Environment*, 63, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.042>.
110. Tantasavasdi, C., Srebric, J., Chen, Q. (2001). Natural ventilation design for houses in Thailand. *Energy and Buildings*, 33 (8), 815–824. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00073-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00073-1).
111. Tong, Z., Chen, Y., Malkawi, A., Adamkiewicz, G. et al. (2016). Quantifying the impact of traffic-related air pollution on the indoor air quality of a naturally ventilated building. *Environment International*, 89–90, 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.01.016>.
112. Tong, Z. et al. (2017). Microenvironmental air quality impact of a commercial-scale biomass heating system. *Environmental Pollution*, 220, 1112–1120. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.025>.
113. Tong, Z. et al. (2012). Modeling Spatial Variations of Black Carbon Particles in an Urban Highway-Building Environment. *Environmental Science & Technology*, 46 (1), 312–319. <https://doi.org/10.1021/es201938v>.

114. Tong, Z., Baldauf, R.W. et al. (2016). Roadside vegetation barrier designs to mitigate near-road air pollution impacts. *Science of The Total Environment*, 541, 920–927. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.067>.
115. Tong, Z. et al. (2015). Quantifying the effect of vegetation on near-road air quality using brief campaigns. *Environmental Pollution*, 201, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.02.026>.
116. Jiang, Z. et al. (2023). A literature review of cross ventilation in buildings. *Energy and Buildings*, 291, 113143. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113143>.
117. De Dear, R. et al. (2020) A review of adaptive thermal comfort research since 1998. *Energy and Buildings*, 214, 109893. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109893>.
118. Carlucci, S. et al. (2018). Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents. *Building and Environment*, 137, 73–89. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>.
119. López Plazas, F., Sáenz De Tejada, C. (2024). Natural ventilation to improve indoor air quality (IAQ) in existing homes: The development of health-based and context-specific user guidelines. *Energy and Buildings*, 314, 114248. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114248>.
120. Kaushik, A. et al. (2020). Effect of thermal comfort on occupant productivity in office buildings: Response surface analysis. *Building and Environment*, 180, 107021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107021>.
121. Zhong, H.-Y. et al. (2022). Single-sided natural ventilation in buildings: a critical literature review. *Building and Environment*, 212, 108797. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108797>.
122. Daish, N.C. et al. (2016). Impact of aperture separation on wind-driven single-sided natural ventilation. *Building and Environment*, 108, 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.015>.
123. Arinami, Y. et al. (2019). Performance evaluation of single-sided natural ventilation for generic building using large-eddy simulations: Effect of guide vanes and

adjacent obstacles. *Building and Environment*, 154, 68–80.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.021>.

124. Fan, S. et al. (2021). A full-scale field study for evaluation of simple analytical models of cross ventilation and single-sided ventilation. *Building and Environment*, 187, 107386. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107386>.

125. Davies Wykes, M.S., Chahour, E., Linden, P.F. (2020). The effect of an indoor-outdoor temperature difference on transient cross-ventilation. *Building and Environment*, 168, 106447. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106447>.

126. Wu, Y. et al. (2021). Numerical study on natural ventilation of the wind tower: Effects of combining with different window configurations in a low-rise house. *Building and Environment*, 188, 107450. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107450>.

127. Endo, T. et al. (2019). A case study on the effects of the wind catcher and Taiko-shoji in Japanese environment-friendly house. *International Journal of Sustainable Energy*, 38 (1), 89–103. <https://doi.org/10.1080/14786451.2015.1009069>.

128. Mohamed, M.A., Nayer, A. (2018). On Wind Catcher Integration in Contemporary Buildings in Jeddah. *EQA - International Journal of Environmental Quality*, 1-14. <https://doi.org/10.6092/ISSN.2281-4485/8240>.

129. Allocca, C., Chen, Q., Glicksman, L.R. (2003). Design analysis of single-sided natural ventilation. *Energy and Buildings*, 35 (8), 785–795. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00239-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00239-6).

130. Gough, H.L. et al. (2020). Evaluating single-sided natural ventilation models against full-scale idealised measurements: Impact of wind direction and turbulence. *Building and Environment*, 170, 106556. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106556>.

131. Larsen, T.S. and Heiselberg, P. (2008). Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference. *Energy and Buildings*, 40 (6), 1031–1040. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.012>.

132. Maryam Kouhirostami (2020). Natural Ventilation Through Windows in a Classroom (CFD Analysis Cross-Ventilation of Asymmetric Openings: Impact of Wind Direction and Louvers Design). 9907978 Bytes. <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.12733031>.
133. Pan, W., Liu, S., Wang, Y. et al. (2019). Measurement of cross-ventilation rate in urban multi-zone dwellings. *Building and Environment*, 158, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.037>.
134. Ji, W., Zhao, K., Zhao, B. (2022). The trend of natural ventilation potential in 74 Chinese cities from 2014 to 2019: Impact of air pollution and climate change. *Building and Environment*, 218, 109146. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109146>.
135. Afshin, M. et al. (2016). An experimental study on the evaluation of natural ventilation performance of a two-sided wind-catcher for various wind angles. *Renewable Energy*, 85, 1068–1078. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.036>.
136. Jomehzadeh, F. et al. (2017). A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 736–756. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.254>.
137. Hughes, B.R., Cheuk-Ming, M. (2011). A study of wind and buoyancy driven flows through commercial wind towers. *Energy and Buildings*, 43 (7), 1784–1791. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.022>.
138. Alsailani, M., Montazeri, H., Rezaeiha, A. (2021). Towards optimal aerodynamic design of wind catchers: Impact of geometrical characteristics. *Renewable Energy*, 168, pp. 1344–1363. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.053>.
139. Chaudhry, H.N., Calautit, J.K., Hughes, B.R. (2015). Computational analysis of a wind tower assisted passive cooling technology for the built environment. *Journal of Building Engineering*, 1, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.03.004>.
140. Ghoulem, M. et al. (2020). Analysis of passive downdraught evaporative cooling windcatcher for greenhouses in hot climatic conditions: Parametric study and

impact of neighbouring structures. *Biosystems Engineering*, 197, 105–121.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.06.016>.

141. Sheikhshahrokhdehkordi, M., Khalesi, J., Goudarzi, N. (2020). High-performance building: Sensitivity analysis for simulating different combinations of components of a two-sided windcatcher. *Journal of Building Engineering*, 28, 101079.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101079>.

142. Cruz-Salas, M.V., Castillo, J.A. and Huelsz, G. (2018). Effect of windexchanger duct cross-section area and geometry on the room airflow distribution. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 179, 514–523.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.06.022>.

143. Farouk, M. (2020). Comparative study of hexagon & square windcatchers using CFD simulations. *Journal of Building Engineering*, 31, 101366.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101366>.

144. Nejat, P. et al. (2016). Evaluation of a two-sided windcatcher integrated with wing wall (as a new design) and comparison with a conventional windcatcher. *Energy and Buildings*, 126, 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.025>.

145. Montazeri, H., Montazeri, F. (2018). CFD simulation of cross-ventilation in buildings using rooftop wind-catchers: Impact of outlet openings. *Renewable Energy*, 118, 502–520. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.032>.

146. Poshtiri, A.H., Mohabbati, S.M. (2017). Performance analysis of wind catcher integrated with shower cooling system to meet thermal comfort conditions in buildings. *Journal of Cleaner Production*, 148, 452–466.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.160>.

147. Varela-Boydo, C.A. and Moya, S.L. (2020). Inlet extensions for wind towers to improve natural ventilation in buildings. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101933.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101933>.

148. Dehghan, A.A., Esfeh, M.K. and Manshadi, M.D. (2013). Natural ventilation characteristics of one-sided wind catchers: experimental and analytical evaluation. *Energy and Buildings*, 61, 366–377. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.048>.

149. Dehghani Mohamadabadi, H. et al. (2018) Numerical and experimental performance analysis of a four-sided wind tower adjoining parlor and courtyard at different wind incident angles. *Energy and Buildings*, 172, 525–536. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.006>.
150. Sadeghi, M. et al. (2020). Effects of urban context on the indoor thermal comfort performance of windcatchers in a residential setting. *Energy and Buildings*, 219, 110010. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110010>.
151. Ameer, S.A., Chaudhry, H.N. and Agha, A. (2016). Influence of roof topology on the air distribution and ventilation effectiveness of wind towers. *Energy and Buildings*, 130, 733–746. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.005>.
152. Calautit, J.K., O'Connor, D. and Hughes, B.R. (2014). Determining the optimum spacing and arrangement for commercial wind towers for ventilation performance. *Building and Environment*, 82, 274–287. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.024>.
153. ДСТУ-Н Б В.3.2-3:2014 (2014). Настанова з виконання термомодернізації житлових будинків Діючий від 01.10.2015. Київ: Мінрегіонбуд України, 40.
154. Білоус І. Ю. (2019). Оцінювання енергоефективності будівлі в умовах динамічної зміни характеристик середовища: автореф. дис. Київ: КПІ, 22.
155. Taoufiq, M., Abdelaziz, M., Adil, B., El, O. (2018). Evaluating the Impact of Air Infiltrations on the Thermal and Energy Performances for Different Types of Dwellings in Casablanca City. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 8 (6), 793–800. <https://doi.org/10.24247/ijmperdddec201880>.
156. Wang, B., Malkawi, A. (2019). Design-based natural ventilation evaluation in early stage for high performance buildings. *Sustainable Cities and Society*, 45, 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.024>.
157. Bilous, I., Deshko, V., Sukhodub, I. (2018). Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear

multivariate regression models. *Journal of Building Engineering*, 20, 327–336.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.021>.

158. Southall, R.G. (2018). An assessment of the potential of supply-side ventilation demand control to regulate natural ventilation flow patterns and reduce domestic space heating consumption. *Energy and Buildings*, 168, 201–214.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.005>.

159. Chen, Y. et al. (2019). Achieving natural ventilation potential in practice: Control schemes and levels of automation. *Applied Energy*, 235, 1141–1152.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.016>.

160. Berge, A. (2011). Analysis of Methods to Calculate Air Infiltration for Use in Energy Calculations. Göteborg, Sweden: Chalmers university of technology, 98. URL:
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55142919>. – дата звернення 13.07.2025.

161. Liddament, M.W. (1996). A guide to energy efficient ventilation. Coventry: Air Infiltration and Ventilation Centre (Technical note / AIC, Ventguide-1996), 1996, 274. ISBN 0 946075 85 9.

162. Younes, C., Shdid, C.A., Bitsuamlak, G. (2012). Air infiltration through building envelopes: A review. *Journal of Building Physics*, 35(3), 267–302.
<https://doi.org/10.1177/1744259111423085>.

163. Etheridge, D., Sandberg, M. (1996). Building ventilation: theory and measurement. Chichester, New York: John Wiley & Sons, 752. ISBN 047196087X.

164. Pan, W., Liu, S., Li, S., et al. (2019). A model for calculating single-sided natural ventilation rate in an urban residential apartment. *Building and Environment*, 147, 372–381. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.047>.

165. Larsen, T.S. et al. (2018). Calculation methods for single-sided natural ventilation: Now and ahead. *Energy and Buildings*, 177, 279–289.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.047>.

166. Chu, C.-R. et al. (2015). Wind-driven natural ventilation for buildings with two openings on the same external wall. *Energy and Buildings*, 108, 365–372.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.041>.

167. Seifert, J. et al. (2006). Calculation of wind-driven cross ventilation in buildings with large openings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94(12), 925–947. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.04.002>.
168. Karava, P., Stathopoulos, T., Athienitis, A.K. (2011). Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable façade elements. *Building and Environment*, 46(1), 266–279. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.022>.
169. Jiaxiang, L. et al. (2023). Experiment and numerical investigation of a novel flap fin louver windcatcher for multi-directional natural ventilation and passive technology integration. *Building and Environment*, 242, 110429. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110429>.
170. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 (2011). Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. Чинний від 01.11.2011. Київ: Мінрегіонбуд України, 123.
171. Волокита, А.М., Селіванов, В.Л. (2022). Основи теорії планування експерименту: розділ дисципліни «Методика та організація наукових досліджень»: навч. посібник. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 41.
172. Ковылянский, Я. А., Старостенко, В. И., Старостенко, Н. Н. (1995). Перспективы применения аккумуляторов фазового перехода. Киев: Энерг. стр-во, № 4.
173. Барабашук, В.И., Креденцер, Б.П., Мирошниченко, В.И. (1984). Планирование эксперимента в технике. Киев: Техника, 200 с.
174. Володарський, Є. Т., Кошева, Л. О. (2023). Теорія та практика експериментальних досліджень: навч. посібник. Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 299.
175. Возняк, О.Т., Желих, В.М. (2003). Основи наукових досліджень у будівництві: навч. посібник Львів: Львівська політехніка, 176 с.
176. Курек, І. Г., Курек, Є. І., Олійнич-Лисюк, А.В., Струк, Я. М. (2021). Обчислення похибок прямих та опосередкованих вимірювань: методичний посібник. Чернівці, 48 с.

177. Мельник, Л.Г., Сотник, І.М. (2015). Економіка енергетики: підручник. Суми: Університетська книга, 378 с.
178. Скловська, Е.Г., Сердюк, Б.Н. (2024). Економіка енергетики: підручник. Київ : Каравела, 500 с.
179. Мельник, Л.Г. (2015). Економіка енергетики: підручник. Суми: Університетська книга, 378 с.
180. Круш, П.В., Шелехов, К.В. (2014). Економіка підприємства. (Книга 2): підручник. Київ: Політехніка, 624 с.
181. Нікульнікова, Г. В., Бондарчук, О. М., Астаф'єва, К. О. (2024). Економічне оцінювання інвестиційних проектів енергозберігаючих технологій. Галицький економічний вісник, 86 (1), 7-13.
https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2024.01.007.

Додаток А

Список опублікованих праць. Особистий внесок здобувача

Статті, які включені до міжнародних наукометричних баз, статті у наукових виданнях інших держав та у наукових фахових виданнях України:

1. Желих В.М., Савін В.В. (2023). Особливості використання вітровловлювачів у системах енергоощадної вентиляції. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Науково-технічний збірник. Випуск 47. Київ: КНУБА, 53 с. <http://vothp.knuba.edu.ua/article/view/308932> (Фахове видання категорії Б).

Особистий внесок здобувача: досліджено доцільність застосування вітровловлювачів як енергоефективного елемента пасивної системи вентиляції, обґрунтовано вплив конструктивних і гідродинамічних параметрів вітровловлювача на забезпечення нормативних параметрів мікроклімату.

2. Savin V., Kirichenko P. (2024). Optimisation of air exchange in thermally modernised buildings by means of natural ventilation. Journal of Kryvyi Rih National University, 22(2), 60-67. <https://journal-knu.com.ua/en/journals/tom-22-2-2024/optimizatsiya-povitroobminu-v-termomodernizovanikh-budivlyakh-za-dopomogoyu-prirodnoyi-ventilyatsiyi> (Фахове видання категорії Б).

Особистий внесок здобувача: виконано порівняльний аналіз ефективності різних типів припливних елементів пасивної системи вентиляції у термомодернізованих будинках та виконано комп'ютерне моделювання розподілу повітряних потоків, температурних градієнтів та характеру повітрообміну в холодний і теплий періоди року з метою визначення оптимальних конструктивно-технологічних рішень для забезпечення нормативного повітрообміну без залучення механічних вентиляційних засобів.

3. Savin V., Kirichenko P. (2023). Recuperators as a way to improve the efficiency of systems mechanical ventilation systems in terms of energy saving in buildings. Journal of Kryvyi Rih National University, 21 (1), 104-109. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-104-109> (Фахове видання категорії Б).

Особистий внесок здобувача: проведено аналітичну оцінку ефективності використання енергоощадних технологій у системах вентиляції, зокрема

рекуперативних припливно-витяжних систем вентиляції, з урахуванням їхніх конструктивних особливостей.

4. Savin V., Zhelykh V. (2023). Recuperators as an important element for energy efficiency in building ventilation systems. Construction of optimized energy potential. Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, Vol. 12, 71-78. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2023.12.08> (Закордонне фахове видання).

Особистий внесок здобувача: узагальнено підходи щодо оптимальних шляхів підтримання параметрів мікроклімату в умовах холодного клімату.

5. Savin V., Kirichenko P. (2024). Efficient use of ground heat exchangers in energy-saving ventilation. Journal of Kryvyi Rih National University, 22(1), 83-88. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2024-1-58-83-89> (Фахове видання категорії Б).

Особистий внесок здобувача: обґрунтовано доцільність застосування ґрунтових теплообмінників в якості блока попередньої обробки повітря у пасивних системах вентиляції житлових будинків для зменшення енергоспоживання на вентиляцію.

6. Myroniuk K., Furdas Y., Zhelykh V., Adamski M., Gumen O., Savin V., Mitoulis S-A. (2024). Passive Ventilation of Residential Buildings Using the Trombe Wall. Buildings, 14 (10), 3154. <https://doi.org/10.3390/buildings14103154> (SCOPUS / WEB OF SCIENCE, Q2).

Особистий внесок здобувача: систематизовано результати досліджень застосування стіни Тромба як елементу пасивної вентиляції в модульних будинках.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. Вавилюк, В. Ю., Савін, В.В. (24 – 26 травня, 2023, Кривий Ріг). Основні аспекти будівництва енергоощадних будинків. Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства». Кривий Ріг, 92 с. [Матеріали конференції.](#)

Особистий внесок здобувача: описано основні аспекти енергоощадного будівництва з урахуванням вимог до вентиляції та енергоефективності будівель

8. Savin, V., Zhelykh, V. (8 – 10 November, 2023, Częstochowa, Poland). Recuperators as an important element of energy efficiency in building ventilation systems. XX International scientific-technical conference. Materials and energy saving technologies. Chestochowuniversity of technology.

9. Савін, В.В., Желих, В.М. (22 – 24 листопада, 2023, Київ). Особливості використання вітровловлювачів у системах енергоощадної вентиляції. IV Міжнародна науково-практична конференція «Енергія. Ресурси. Екологія». Багатофункціональні енерго- та ресурсоефективні екологічно безпечні технології в архітектурі та будівництві. Київ: КНУБА, 64 – 65. [Тези доповідей](#).

Особистий внесок здобувача: описано специфіку використання вітровловлювачів у сучасних системах природної вентиляції та їх вплив на енергоефективність будівель.

10. Савін В.В., Желих В.М. (27 – 29 листопада, 2024, Київ). Природна вентиляція як енергоефективне рішення для термомодернізованих будівель. V Міжнародна науково-практична конференція «Енергія. Ресурси. Екологія». Багатофункціональні енерго- та ресурсоефективні екологічно безпечні технології в архітектурі та будівництві. Київ: КНУБА, 75 – 76 с. [Тези доповідей](#).

Особистий внесок здобувача: висвітлено можливості застосування природної вентиляції для підтримання нормативного повітрообміну в термомодернізованих будівлях.

11. Вавилюк В. Ю., Савін В.В. (22 – 24 травня, 2024, Кривий Ріг). Ґрунтовий повітряний теплообмінник. Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства». Кривий Ріг, 96 с. [Матеріали конференції](#).

Особистий внесок здобувача: описано вплив енергії вітру на формування мікроклімату та комфорт всередині будинку.

12. Савін В.В. (28 – 30 травня, 2025, Кривий Ріг). Підвищення енергоефективності термомодернізованих будівель шляхом оптимізації природного повітрообміну. Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства». Кривий Ріг, 2025.

Особистий внесок здобувача: висвітлено важливість підвищення енергоефективності термомодернізованих будівель шляхом оптимізації природного повітрообміну.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень та окремі розділи дисертації доповідалися й обговорювалися на: Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (Кривий Ріг, 2023) [7]; XX International scientific-technical conference. Materials and energy saving technologies (Chestochowuniversity of technology, 2023) [8]; IV Міжнародній науково-практичній конференції «Енергія. Ресурси. Екологія». Багатофункціональні енерго- та ресурсоефективні екологічно безпечні технології в архітектурі та будівництві (Київ, 2023) [9]; V Міжнародній науково-практичній конференції «Енергія. Ресурси. Екологія». Багатофункціональні енерго- та ресурсоефективні екологічно безпечні технології в архітектурі та будівництві (Київ, 2024) [10]; Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (Кривий Ріг, 2024) [11]; Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (Кривий Ріг, 2025) [12].

Додаток Б

Акти впровадження результатів роботи



Товариство з обмеженою відповідальністю
«КРИВБАСПРОЕКТ»

пр. Поштовий, 40, м Кривий Ріг, Україна, 50000, ЄДРПОУ 45563913
 телефон +38(067) 543-64-72
 Web: krivbassproect.com.ua e-mail: krivbassproect@krivbassproect.com.ua

24.09.2025 р. № 07/415

АКТ

**використання результатів дисертаційної роботи САВІНА Валерія
 Валерійовича «Підвищення ефективності системи підтримання
 параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках з пасивною
 вентиляцією», представленої на здобуття наукового ступеня доктора
 філософії**

Наступним актом підтверджено, що використання результатів дисертаційної роботи Савіна В.В. «Підвищення ефективності системи підтримання параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках з пасивною вентиляцією» дозволило зменшити енерговитрати системою підтримання параметрів мікроклімату на підприємстві шляхом впровадження вітровловлювачів у систему припливної вентиляції адміністративного блоку.

Впровадження вітровловлювачів на підприємстві дозволило досягти щомісячної економії витрат електроенергії на вентиляцію в розмірі 1425,60 грн лише на одній зоні припливної вентиляції. При середньому часі роботи припливної вентиляційної установки 10 год/доб та потужності 1,5 кВт за календарний місяць (22 робочі дні) загальна річна економія становитиме понад 17 000 грн, а термін повної окупності впровадження склав менше 3 місяців, що свідчить про надзвичайно високу економічну ефективність запропонованого рішення.

Директор ТОВ «КРИВБАСПРОЕКТ»



Андрій БОЛОТНИКОВ



**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
ТРУБНИЙ ЗАВОД «СЛАВСАНТ»**

Юридична адреса: вул. Чернишевська, 65, к. 7, м. Харків, Харківська область, 61002, Україна
Адреса для листування: вул. Харківська, б. 15Д, м. Павлоград, Дніпропетровська область, 51403, Україна
ЄДРПОУ 14338180, ПІН 143381812029, витяг ПДВ № 1720314500116 від 07.04.2017 р.
IBAN UA233348510000000002600933170 в АТ "ПУМБ" або
IBAN UA703223130000026007000037716 в АТ "УКРЕКСІМБАНК"

Від 07/10/2025 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Виконавчий директор ТОВ ТЗ Славсант,
докт. техн. наук Олександр Кіпко



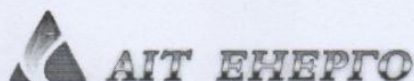
АКТ

**про використання результатів дисертаційної роботи САВІНА Валерія Валерійовича
«Підвищення ефективності системи підтримання параметрів мікроклімату в
енергоощадних будинках з пасивною вентиляцією», представленої на здобуття
наукового ступеня доктора філософії**

Даний акт складено на підтвердження того, що результати дисертаційної роботи Савіна В.В. «Підвищення ефективності системи підтримання параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках з пасивною вентиляцією» впроваджено в адміністративному корпусі підприємства «Трубний завод Славсант».

Експериментальний зразок вітровловлювача було під'єднано до повітрязабірного отвору існуючої вентиляційної системи одного з офісів, що розташований на верхньому поверсі будівлі. У ході випробувань здійснювався контроль роботи системи за різних метеорологічних умовах. Встановлено здатність вітровловлювача забезпечувати стабільний природний повітрообмін без застосування електричних вентиляторів, що дозволяє підтримувати параметри мікроклімату у межах, визначених нормами для офісних приміщень.

Отримані результати підтверджують доцільність подальшого використання вітровловлювача у адміністративних приміщеннях підприємства.



ПП «АІТ ЕНЕРГО»
50031, м. Кривий Ріг, вул. Женеvська, 1
Тел. 0675683740

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

САВІНА Валерія Валерійовича

«Підвищення ефективності системи підтримання параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках з пасивною вентиляцією»
в практику роботи ПП «АІТ ЕНЕРГО»

Приватне підприємство «АІТ ЕНЕРГО» протягом багатьох років здійснює діяльність у сфері проєктування, монтажу та модернізації інженерних мереж. З метою підвищення ефективності своєї роботи підприємство налагодило співпрацю з українськими та іноземними партнерами у напрямках енергоощадності, автоматизації інженерних систем та впровадження інноваційних технологій у системах опалення і вентиляції.

На одному з об'єктів малої поверховості було проведено експериментальне випробування результатів дисертаційної роботи Савіна В.В. «Підвищення ефективності системи підтримання параметрів мікроклімату в енергоощадних будинках з пасивною вентиляцією». Порівняльна оцінка роботи вітровловлювача відносно традиційних припливних решіток і механічних вентиляторів засвідчила стабільне забезпечення природного повітрообміну без застосування електроприводних установок.

З огляду на отримані результати прийнято рішення впровадити напрацювання дисертаційної роботи у проєктні рішення ПП «АІТ ЕНЕРГО», зокрема передбачити використання вітровловлювача як рекомендованого елемента у типових схемах вентиляції для приватних будинків, адміністративних приміщень та технологічних майстерень із незначними тепловиділеннями.

Директор



А. ЄРЬОМЕНКО

Надання комплексу послуг у сфері інжинірингу

ДОДАТОК В
Патенти на корисну модель



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **157039** (13) **U**
(51) МПК (2024.01)
F24F 7/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

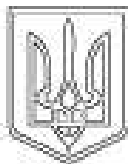
(21) Номер заявки: u 2023 06283	(72) Винахідник(и): Савін Валерій Валерійович (UA), Желих Василь Михайлович (UA)
(22) Дата подання заявки: 22.12.2023	(73) Володілець (володілці): КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Дніпропетровська обл., 50027 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 05.09.2024	(74) Представник: Кривенко Юрій Юрійович, реєстр. №255
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 04.09.2024, Бюл.№ 36	

(54) ВІТРОВЛОВЛЮВАЧ

(57) Реферат:

Вітровловлювач містить заслінки, встановлені на пластинчастих ребрах, та розташований в центрі вітровловлювача круглий трубчастий повітропровід з можливістю виведення застарілого повітря з верхньої частини вітровловлювача. Вітровловлювач містить рівновіддалені від центральної осі грані, які з'єднані між собою, утворюючи корпус вітровловлювача. Кожна з граней має форму паралелограма. Грані мають вигнуті напрямні ребра, що виступають всередину корпусу вітровловлювача з місць приєднання прилеглих граней, та з'єднані з вигнутими напрямними ребрами інших граней в центрі корпусу вітровловлювача, утворюючи пучок напрямних вигнутих ребер. У верхній частині корпусу вітровловлювача встановлено глуху кришку. В нижній частині корпусу вітровловлювача з'єднано з конфузоров, який приєднано до вентиляційного каналу. Поверхня кожної грані має отвір, який має форму паралелограма. З внутрішньої сторони кожної грані встановлено жалюзі-заслінки, які закріплені вздовж однієї довгої сторони грані і виконані рухомими.

UA 157039 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **157606** (13) **U**
(51) МПК (2024.01)
F24F 7/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки:	u 2024 00626	(72) Винахідник(и):	Савін Валерій Валерійович (UA), Желих Василь Михайлович (UA)
(22) Дата подання заявки:	07.02.2024	(73) Володівець (володітель):	КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Віталія Матусовича, буд. 11, м. Кривий Ріг, 50027 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності:	07.11.2024	(74) Представник:	Кривенко Юрій Юрійович, реєстр. №255
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію:	06.11.2024, Бюл.№ 45		

(54) ВІТРОВЛОВЛЮВАЧ

(57) Реферат:

Вітровловлювач містить вентиляційний канал, на якому встановлений ковпак. При цьому корпус вітровловлювача складається з рівновіддалених від центральної осі граней, які мають форму прямокутника, які з'єднані між собою. При цьому кожна грань має отвір, який має форму паралелограма, при цьому грані мають вигнуті напрямні ребра, кут нахилу яких дорівнює куту нахилу отворів, які виступають всередину корпусу вітровловлювача та приєднані до стінки вентиляційного каналу, утворюючи пучок напрямних вигнутих ребер. Верхня частина пучка напрямних вигнутих ребер приєднана до кришки, а нижня частина повторює форму конфузора та займає його частину. У верхній частині корпусу вітровловлювача встановлено кришку, яка має отвір для вентиляційного каналу, а в нижній частині корпус вітровловлювача приєднано до конфузора, який приєднано до припливного вентиляційного каналу, при цьому вентиляційний канал у верхній частині обладнано вентиляційним ковпаком.

UA 157606 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **157537** (13) **U**
(51) МПК (2024.01)
F24F 7/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки	u 2024 01317	(72) Винахідник(и):	Савін Валерій Валерійович (UA), Желих Василь Михайлович (UA)
(22) Дата подання заявки	12.03.2024	(73) Володівець (володільці):	КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Віталія Матусевича, буд. 11, м. Кривий Ріг, 50027 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності	31.10.2024	(74) Представник:	Кривенко Юрій Юрійович, реєстр. №255
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію:	30.10.2024, Бюл.№ 44		

**(54) ВІТРОВЛОВЛЮВАЧ З ЗАСЛІНКАМИ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ПОТРАПЛЯННЯ АТМОСФЕРНИХ
ОПАДІВ ДО СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ**

(57) Реферат:

Вітровловлювач має припливний і витяжний повітропроводи, верхню та нижню кришки, розміщений на системі з припливного і витяжного повітропроводів. Вітровловлювач складається з рівновіддалених від центральної осі прямокутних пластинчастих ребер, які з'єднані між собою, утворюючи корпус вітровловлювача, при цьому поверхня кожного ребра має прямокутний отвір, а з внутрішнього боку кожного ребра розміщено рухомі пластинчасті заслінки, які кріпляться вздовж одного боку ребра. При цьому рухомі заслінки виконані з можливістю самостійного відкривання та закривання під дією тиску вітру в отворах ребер, а в закритому положенні - перекривання всієї площі отворів ребер, при цьому на корпусі вітровловлювача вздовж всієї висоти та довжини кожного ребра розміщено фігурні заслінки, які мають розрахунковий кут нахилу 45-55°.

UA 157537 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **157218** (13) **U**
(51) МПК (2024.01)
F24F 7/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2024 00887	(72) Винахідник(и): Савін Валерій Валерійович (UA), Желих Василь Михайлович (UA)
(22) Дата подання заявки: 21.02.2024	(73) Володілець (володільці): КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Віталія Матусевича, буд. 11, м. Кривий Ріг, 50027 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 19.09.2024	(74) Представник: Кривенко Юрій Юрійович, реєстр. №255
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 18.09.2024, Бюл.№ 38	

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВЕНТИЛЯЦІЇ ПРИМІЩЕНЬ

(57) Реферат:

Пристрій для вентиляції приміщень містить вертикальний вентиляційний канал, у верхній частині якого закріплений вітровловлювач, виконаний у вигляді напрямних ребер. Верхня частина вентиляційного каналу під'єднана до конфузора вітровловлювача з напрямними ребрами. Під вітровловлювачем розташований пристрій для уловлювання вологи, виконаний у вигляді патрубку, всередині якого розташований вологопоглинач, який виконаний з вологопоглинаючої речовини. Всередині вологопоглинача розташований канал, поверхня якого закріплена перфорованим матеріалом. Внутрішня поверхня каналу пристрою для уловлювання вологи має спіралеподібну форму та діаметр, який дорівнює внутрішньому діаметру вентиляційного каналу. Крок завихрення спіралеподібної внутрішньої поверхні каналу вологопоглинача співпадає з кроком руху повітря, яке, надходячи до вітровловлювача, завихрюється напрямними ребрами.

UA 157218 U