

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ЧИРКОВА АННА ПЕТРІВНА**

УДК 004.94:[621.184.5+533.6+536]

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОСОБЛИВОСТІ ЗОВНІШНЬОЇ АЕРОДИНАМІКИ І ТЕПЛООБМІНУ  
ДИМОВИХ ТРУБ У МІСЬКІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ ТА НА  
МАЙДАНЧИКУ ТЕС**

105 Прикладна фізика та наноматеріали  
10 Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

---

Анна ЧИРКОВА

**Науковий керівник:** Халатов Артем Артемович, академік НАН України,  
доктор технічних наук, професор

Київ – 2024

## АНОТАЦІЯ

Чиркова А.П. Особливості зовнішньої аеродинаміки і теплообміну димових труб у міській інфраструктурі та на майданчику ТЕС. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Найменування вищого навчального закладу, в якому провадилася підготовка: НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО».

Дисертаційна робота присвячена вивченню аеродинаміки та теплообміну димових труб ТЕС, розташованих у нескінченному просторі, у міській інфраструктурі та на промисловому майданчику ТЕС. В роботі отримані нові наукові результати, що характеризують фізичні особливості розподілу швидкості, температури, статичного тиску та коефіцієнта тепловіддачі на поверхні конічної труби за різних граничних умов.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаної літератури до кожного розділу, додатку. Загальний обсяг дисертації становить 128 сторінок, включаючи 45 рисунків та 6 таблиць, загальна кількість використаних джерел становить 77 посилань.

У **вступі** розглянуто основні проблеми енергетики України, пов'язані з експлуатацією димових труб ТЕЦ. Обґрунтовується актуальність теми дисертації, ставляться завдання для її досягнення. Обґрунтовано метод дослідження. Розглянуті нові наукові результати та їх практичне значення, зв'язок дисертації з програмою фундаментальних робіт НАН України, особистий внесок автора та апробація результатів дослідження.

**У першому розділі** представлено короткий огляд сучасного стану проблеми експлуатації димових труб ТЕС. Розглянуто основні конструкції димових труб, проаналізовано основні проблеми їх експлуатації, пов'язані з випаданням хімічно агресивного конденсату, що призводить до деградації внутрішньої поверхні димових труб та порушення екологічно безпечних умов їх експлуатації. Детально розглянуто особливості аеродинаміки та теплообміну при поперечному обтіканні круглого нескінченного циліндра для докритичного, надкритичного та трансзвукового режимів обтікання. Проаналізовано вплив зовнішньої турбулентності та шорсткості поверхні на теплообмін і аеродинаміку при поперечному обтіканні труби. Наводиться рівняння для профілю швидкості набігаючого вітру для трьох типів інфраструктури навколишнього простору. Розглянуто особливості обтікання димової труби та окремих будівель на майданчиках АЕС та ТЕС за різного напрямку вітру. Сформульовано мету роботи, обґрунтовано основні завдання для дослідження, зроблено вибір методу дослідження.

**У другому розділі** розглянуто методичні аспекти комп'ютерного моделювання аеродинаміки та теплообміну при зовнішньому обтіканні одиночної конічної труби, яка розташована на земній поверхні. Наводиться математичний опис проблеми, розглянуто геометричні моделі, які досліджені у роботі, аналізуються особливості завдання граничних умов. Розглянуті методи чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь руху та енергії, способи дискретизації рівнянь та методи розв'язання системи алгебраїчних рівнянь. На прикладі теплообміну при докритичному режимі обтікання круглого циліндра виконано верифікацію сіткової моделі та обґрунтовано модель турбулентності, що застосовується в роботі.

**У третьому розділі** виконано комп'ютерне моделювання аеродинаміки та теплообміну на поверхні одиночної конічної димової труби, розташованої у нескінченному просторі, а також у міській інфраструктурі. Запропоновано геометричну та комп'ютерну моделі димової труби, розглянуто методичні

аспекти чисельного моделювання та представлено програму досліджень. У розрахунках на поверхні труби задавалися граничні умови I роду, використана RNG  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентності. Максимальні значення тепловіддачі досягаються в середній частині труби, біля земної поверхні та у гирлі труби. Виявлено, що конусність труби практично не впливає на середню по всій висоті труби. Форма профілю швидкості вітру перед димовою трубою, яка визначається типом інфраструктури навколишнього простору, має значний вплив на розподіл локальної тепловіддачі по висоті труби. Зі зростанням середньої швидкості набігаючого потоку вітру середня по всій висоті труби тепловіддача зростає приблизно за лінійним законом.

У четвертому розділі розглянуті аеродинаміка та теплообмін біля одиночної конічної димової труби, розташованої в умовах промислового майданчика ТЕС. Для виконання досліджень розроблено спрощену геометричну та комп'ютерну моделі майданчика ТЕС, які враховують основні елементи її інфраструктури. На поверхні труби задавалися граничні умови I роду, а в розрахунках використана RNG  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентності. На межах майданчика ставився профіль швидкості, який відповідає умовам міської забудови. Програма досліджень включає різний напрямок вітру та різні сезонні температурні умови, що притаманні для умов України. Показано, що інфраструктура майданчика ТЕС істотно впливає на умови обтікання димової труби та тепловіддачу. Показано, що періодична зміна швидкості, температури, тиску та теплообміну в кормовій частині труби має місце тільки вище даху машинного залу. Використання у розрахунках рівномірного профілю швидкості перед трубою може призводити до значних помилок у розрахунках локальної тепловіддачі. У приземній зоні труби та в області машинного залу тепловіддача може бути заниженою і завищеною порівняно з результатами розрахунку для рівномірного профілю швидкості, а вище даху машинного залу це рівняння показує завищені результати.

Виконано порівняльний аналіз розподілу локальної тепловіддачі по висоті труби при різному напрямку вітру.

**В дисертаційній роботі отримано наступні наукові результати:**

**Вперше:**

1. Виявлено періодичний характер зміни швидкості, тиску, температури та коефіцієнта тепловіддачі в кормовій частині конічної димової труби при її поперечному обтіканні для різних граничних умов.

2. Показано, що для труби у нескінченному просторі з рівномірним профілем швидкості вітру на вході конусність труби не впливає на середню по висоті труби тепловіддачу. Зі зростанням швидкості набігаючого потоку середній коефіцієнт тепловіддачі зростає практично лінійно – як при рівномірній, так і при змінній по висоті трубі швидкості потоку.

3. Показано, що інфраструктура міського простору та промислового майданчика ТЕС має істотний вплив на локальну тепловіддачу димової труби ТЕС, що зумовлено впливом шару біля земної поверхні на граничні умови, відривними та тривимірними течіями.

4. Виконано дослідження та отримано нові результати, що характеризують аеродинаміку та теплообмін біля зовнішньої поверхні димової труби за умов сумісного впливу інфраструктури міського простору та промислового майданчика ТЕС.

**Удосконалено:**

5. Методичні рекомендації щодо комп'ютерного моделювання аеродинаміки та локального теплообміну на зовнішній поверхні одиночної конічної труби при її поперечному обтіканні в умовах міського простору та промислового майданчика ТЕС.

6. Методика розрахунку локального теплообміну на зовнішній поверхні конічної димової труби при сумісному впливі швидкості, температури та

направлення потоку вітру з урахуванням інфраструктури міського простору та промислового майданчика ТЕС.

### **Набуло подальшого розвитку:**

7. Більш глибоке розуміння фізичного механізму процесів аеродинаміки та локального теплообміну при поперечному обтіканні одиночної конічної димової труби, розташованій в міській інфраструктурі та на майданчику ТЕС.

8. Розуміння, що умови експлуатації димової труби ТЕС (розташування, напрям вітру, інфраструктура навколишнього простору та промислового майданчика ТЕС) мають суттєвий вплив на аеродинаміку димової труби та повинні враховуватися при розрахунку зовнішнього теплообміну.

### **Практичне значення результатів, представлених у дисертації:**

1. Отримані в роботі результати формують більш точні та обґрунтовані рекомендації в частині графіка режиму роботи нових димових труб, а також димових труб, що знаходяться в експлуатації ТЕС, вони також можуть використовуватися для оцінки залишкового ресурсу димової труби з урахуванням деградації її внутрішнього стану у процесі експлуатації. Отримані результати використані у науковій роботі «Розроблення методів і засобів підвищення експлуатаційної надійності та екологічної ефективності димових труб теплоенергетичних установок» (договір № 1-102/02, тема № 1.7.1.890) в рамках Цільової програми наукових досліджень Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України, реєстраційний № 0120U101123.

2. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення математичних моделей під час комп'ютерного моделювання зовнішньої аеродинаміки та теплообміну при поперечному обтіканні конічної димової труби за складних граничних умов.

**Ключові слова:** аеродинаміка; теплообмін; димова труба; числове моделювання; міська інфраструктура; теплова електростанція; ТЕС; граничні умови; зовнішнє обтікання; конденсат; Ansys, Fluent; модель турбулентності; математичне моделювання; числа Рейнольдса; гідродинаміка; 3D модель; швидкість; коефіцієнт тепловіддачі; поперечне обтікання; ламінарний потік; турбулентність; рівняння Нав'є-Стокса;  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентності; поле швидкості; вихрова структура; циліндр; конусність; дискретизація; диференціальні рівняння; сіткова модель; пристінковий шар; верифікація; профіль швидкості; напрямок вітру.

## SUMMARY

**A.P. Chyrkova.** External aerodynamics and heat transfer over a chimney located in the urban environment and on the platform of the thermal power station. – Qualifying scientific work based on manuscripts.

Dissertation for the obtained scientific research of the Doctor of Philosophy in specialty 105 Applied physics and nanomaterials.

Name of the higher educational institution where the training took place: NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF UKRAINE «IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE».

In the introduction, the main problems of Ukraine's energy industry related to the operation of TPP chimneys (smoke pipes) are considered, the relevance of the dissertation topic have been substantiated, and tasks for its achievement have been set. The research method has been substantiated. The new scientific results and their practical significance, the connection of the thesis with the program of fundamental works of the National Academy of Sciences of Ukraine, the author's personal contribution and the approval of the research results are considered.

The dissertation is devoted to the study of aerodynamics and heat transfer over the thermal power plant chimney located in the infinite space, in the urban environment, as well as on the industrial site of the thermal power plant (TPP). The new physical peculiarities characterizing the flow speed, temperature, and static pressure, heat transfer distribution were obtained on the conical pipe surface under various boundary conditions.

**The structure and scope of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusions and a list of used literature for each chapter, an appendix. The total volume of the dissertation is 128 pages, including 45 figures and 6 tables, the total number of used sources is 77 references.

**In the introduction,** the main problems of the energy sector of Ukraine are considered, associated with the operation of chimneys. The relevance of the dissertation topic is justified, the main research goal and the primary research tasks are formulated. The choice of the research approach is justified. The new scientific results are discussed along with their industrial significance, the dissertation link with research program of the National Academy of Sciences is given, the author's personal contribution and the approbation of the dissertation results are considered.

The **first** chapter presents a brief overview of the current state of the problem to be studied. The basic chimney designs in the thermal power engineering are considered, the main problems of their operation are analyzed, mainly related to the precipitation of chemically aggressive condensate, which leads to the gradual degradation of the inner surface of chimney and the violation of environmentally safe conditions of their operation. The aerodynamics and heat exchange features during flowing around a the round infinite cylinder for the subcritical, supercritical and transcritical flow regimes (at high Reynolds numbers) are considered in details. The influence of external turbulence and surface roughness on heat transfer and aerodynamics in the subcritical flowregime around a circular cylinder is analyzed. The flow features around the chimney and buildings placed on the nuclear power and thermal power sites under different wind directions are



considered. An equation is given for the wind speed calculation for three types of infrastructure surrounding the site. The research goal of the work was formulated, the primary research tasks were described, and the method of investigation was justified.

In the **second** chapter, some methodological aspects of the numerical (computer) modeling of aerodynamics and heat exchange at the external flow around a single conical chimney located on the earth surface are considered. The mathematical description of the problem is provided, geometric models investigated in the work are considered, and the peculiarities of the boundary conditions are analyzed. The features of the differential equations of the motion and energy are discussed, the discretization of equations and approach towards solving of algebraic equations are considered. On the example of heat transfer in the subcritical flow around a round cylinder, the mesh structure was verified and the turbulence model used in the work was justified.

In the **third** chapter, the computer modeling of aerodynamics and heat exchange over a single conical chimney located in the infinite space, as well as in the urban infrastructure, is performed. A geometric and computer models of chimney is proposed, the methodological aspects of modeling are considered, and the research program is presented. The maximum heat transfer coefficient are reached in the middle part of the chimney, near the earth surface and at the mouth of it. It was found that the taper of the chimney does not actually affect the average heat transfer over the entire height of the chimney. The wind speed profile in front of the chimney, which is determined by the type of infrastructure of surrounding space, has a significant impact on the local heat transfer distribution over the chimney height. With an increase in the average wind speed in front of the chimney, the average heat transfer over of the entire chimney height increases approximately according to the linear law.

In the **fourth** chapter, the aerodynamics and heat transfer over a single conical chimney, located on the thermal power plant site, are considered. To carry

out research, a simplified geometric and computer models of the thermal power plant site were developed, which takes into account the main components of its infrastructure. The boundary conditions of the Type I were set on the chimney surface, and the RNG k- $\epsilon$  turbulence model was used in calculations. The research program includes different wind directions and seasonal temperature conditions, which are typical for Ukraine. On the site borders, a speed profile was set corresponding to conditions of urban structure on the site borders. It is shown that the infrastructure of the TPP site and the velocity profile at the site borders significantly affect the flow conditions around the chimney and the heat transfer below the engine room roof. In this case, the zone with periodic variations in air speed, temperature, static pressure and heat transfer is observed only in the chimney zone above the engine room roof. It is shown that the use equation for a uniform speed in front of the chimney can lead to significant errors in the local heat transfer distribution. In zone of engine room, the local heat transfer can be both underestimated and overestimated compared to the calculations for the uniform air speed, while above the engine room, this equation demonstrates the overestimated results. A comparative analysis of the local heat transfer distribution over the chimney height with different wind directions was performed. The final dissertation conclusions were presented as well.

**The following scientific results were obtained in the dissertation:**

**For the first time:**

1. The periodic character in the air speed, static pressure, temperature, and heat transfer coefficient in the aft part of the conical chimney at the crossflow was revealed for various boundary conditions.
2. It is shown that for a chimney located in the infinite space with a uniform wind speed profile in front of chimney, the taper of the pipe does not affect the averaged heat transfer over the entire chimney height. With increase in the oncoming flow speed, the average heat transfer coefficient increases almost linearly along the chimney height both with a uniform velocity profile.

3. It is shown that infrastructure of the urban space and the industrial site of the thermal power plant makes the significant influence on the local heat transfer of the chimney, which is caused by the influence of the earth surface on the boundary conditions, separation and three-dimensional flow.

**Improved:**

1. Methodological foundations were developed for the computer modeling of aerodynamics and local heat transfer on the external surface of a single conical chimney at the crossflow in conditions of urban infrastructure and industrial site of the thermal power plant.

2. The methodology of local heat transfer calculations on the external surface of the conical chimney was improved under combined influence of speed, temperature and wind direction, taking into account the infrastructures of the urban space and the industrial site of the thermal power plant.

**Further development took place:**

1. Deeper understanding of the physical nature of the aerodynamic and local heat transfer at the crossflow of a single conical chimney located in the urban space or on the thermal power plant site.

2. A deeper understanding that operation conditions of the chimney (location, wind direction, infrastructure of the surrounding space and industrial site) have a significant impact on the chimney aerodynamics and must be taken into account in the external heat transfer calculation, thermal stress state and final operational resource assessment.

**The practical significance of the results presented in the dissertation is:**

1. The results obtained in the work formulate more accurate and well-founded recommendations in terms of the design and operation conditions of currently used chimneys, they can also be used to estimate the residual resource of the chimney taking into account the degradation of its internal surface during its operation. The results were used in the scientific project "Development of methods and equipment to increase operational reliability and environmental efficiency of

chimneys of thermal power plants" (contract No. 1-102/02, topic No. 1.7.1.890) within the framework of the Targeted Program of Scientific Research of the Division of Physical and Technical Problems of Energy (Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, registration number is 0120U101123).

2. The obtained results can also be used for verification and improvement of the mathematical models during computer modeling of external aerodynamics and local heat transfer at the conical chimney crossflow under the complex boundary conditions.

**Keywords:** aerodynamics and heat transfer; chimney; numerical modeling; city infrastructure; thermal power plant; TPP; boundary conditions; outer flow; condensate; Ansys, Fluent; turbulence model; mathematical modeling; Reynolds numbers; hydrodynamics; 3D model; velocity; heat transfer coefficient; transverse flow; laminar flow; turbulence; the Navier-Stokes equation; k- $\epsilon$  turbulence model; velocity field; vortex structure; cylinder; obliqueness; discretization; differential equations; grid model; wall layer; verification; speed profile; wind direction

### Список публікацій за темою

Матеріали дисертаційної роботи представлені публікаціями у наукових журналах, які входять до переліку наукових фахових видань України категорії Б, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії, а також тих, що входять до періодичних наукових видань, проіндексованих у міжнародній наукометричній базі Scopus:

#### Scopus:

1. A. A. Khalatov, O. V. Shikhabutinova, A. P. Chyrkova, Aerodynamics and Heat Transfer Near the Conical Chimney Placed on the Thermal Power Station Site Systems, *Decision and Control in Energy V*, pp 327–354, 08.08.2023. SSDC, Vol. 481. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_17)

**Фахові журнали категорії Б за спеціальністю 105 «прикладна фізика»:**

2. А. П. Чиркова «Проблеми аеродинаміки та теплообміну в поперечному потоку одиночної конічної труби на площадці ТЕС» (фаховий журнал категорії Б), *Вісник Черкаського університету: фізико-математичні науки*, т.1, №1, 2022.

<https://doi.org/10.31651/2076-5851-2022-77-94>

3. А. П. Чиркова «Методика числового моделювання аеродинаміки і теплообміну при поперечному обтіканні круглого циліндра» (фаховий журнал категорії Б), *журнал «Наукові нотатки»*, Луцький національний технічний університет, № 76, с. 210–213, 2023.

<https://doi.org/10.36910/775.24153966.2023.76.31>

**Матеріали дисертаційної роботи представлені у вигляді доповідей на міжнародних/вітчизняних наукових конференціях:**

4. А. А. Халатов, Г. В. Коваленко, В. С. Олійник, А. П. Ільченко, «Особливості димових труб сучасних ТЕС», XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування», Харків, 27–28 квітня, НТУ «ХП», Харків, с. 59-61, 2021, ISBN 978-617-7476-56-5. Доступно: <http://web.kpi.kharkov.ua/turbine/wp-content/uploads/sites/100/2021/04/Programma-konferentsii-2021-2.pdf>

5. А. А. Халатов, Г. В. Коваленко, В. С. Олійник, О. В. Шіхабутінова, А. П. Ільченко, «Вплив інфраструктури навколишньої поверхні на теплообмін і аеродинаміку конічної димової труби ТЕС». Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування», Харків, 27–28 квітня, НТУ «ХП», с. 62-63, 2021, ISBN 978-617-7476-56-5. Доступно: <http://web.kpi.kharkov.ua/turbine/wp-content/uploads/sites/100/2021/04/Programma-konferentsii-2021-2.pdf>

6. A. P. Chyrkova, O. Yu. Chygai, V. S. Oliinyk «Environmental impact of the surrounding surface on heat transfer aerodynamics of conical chimney thermal power station». Oung researchers in the global world: Approaches and challenges, National university of urban economy in Kharkiv, *The 2021 international forum for young researchers*, April 23, 2021, Kharkiv –o. m. beketov nuue, 2021. <https://www.kname.edu.ua/index.php/ru/events/vii-forum-for-young-researchers-%E2%80%9Cyoung-researchers-in-the-global-world-achievements-and-challenges%E2%80%9D>

7. А. А. Халатов, Г. В. Коваленко, О. В. Шіхабутінова, А. П. Чиркова «Особливості аеродинаміки димових труб сучасних теплових електростанцій». XIX всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «*Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики*», Київ, 13-14 травня, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», с. 128-130, 2021. Доступно: <https://drive.google.com/file/d/1ss8jfeJQt0yn6YHAfNJREZW5UqT2W55p/view>

8. А. П. Чиркова, А. А. Халатов, О. В. Шіхабутінова «Вплив інфраструктури ТЕС на теплообмін і аеродинаміку навколо димової труби» *Восьмої Міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерна гідромеханіка»*, 27-28 вересня 2022 р., Інститут гідродинаміки НАН України, м. Київ, Україна. С. 91–92. Доступно: [http://hydromech.org.ua/content/pdf/ccfd/CompHydroMech\\_2022.pdf](http://hydromech.org.ua/content/pdf/ccfd/CompHydroMech_2022.pdf)

9. А. П. Чиркова, М. А. Данилов, А. А. Халатов, «Теплові процеси та аеродинамічні властивості біля конічної вертикальної димової труби на майданчику теплової електростанції», *XXI Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики»*, 11 – 12 травня 2023 р., КПІ ім. Ігоря Сікорського, с. 110 – 116, м. Київ.

**Статті у фахових вітчизняних журналах категорії Б за тематикою дослідження:**

10. А. П. Чиркова, А. А. Халатов, В. С. Олійник, О. В. Шихабутінова, «Аеродинаміка та теплообмін одиночної конічної труби при зовнішньому обтіканні» (фаховий журнал категорії Б). *Теплофізика та теплоенергетика*, 43(4), с. 25-31, 2021.

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.3>

11. А. П. Чиркова, А. А. Халатов, «Теплообмін та аеродинаміка біля вертикальної конічної труби на майданчику ТЕС» (фаховий журнал категорії Б), *Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, 2022, № 1(9), С. 58-63.

<https://doi.org/10.20998/2078-774X.2022.01.07>

12. О. В. Шихабутінова, А. П. Чиркова, «Аеродинаміка повітряного потоку поблизу конічної димової труби на майданчику теплової електростанції» (фаховий журнал категорії Б), *журнал «Теплофізика та теплоенергетика»*, Інститут технічної теплофізики НАН України, 47(4), с. 51-59, 2022. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2022.6>

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>18</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>33</b>
<b>1.1 Димові труби в теплоенергетиці .....</b>	<b>33</b>
<i>1.1.1 Основні конструкції димових труб ТЕС .....</i>	<i>33</i>
<i>1.1.2 Проблеми експлуатації .....</i>	<i>35</i>
<b>1.2 Фізика поперечного обтікання круглого циліндра.....</b>	<b>36</b>
<i>1.2.1 Гідродинаміка.....</i>	<i>36</i>
<i>1.2.2 Локальний і середній теплообмін .....</i>	<i>38</i>
<i>1.2.3 Вплив турбулентності потоку та шорсткості поверхні.....</i>	<i>41</i>
<b>1.3 Вплив інфраструктури ТЕС на аеродинаміку одиночної димової труби .....</b>	<b>44</b>
<b>1.4 Ціль та завдання.....</b>	<b>49</b>
<b>Висновки до розділу 1.....</b>	<b>52</b>
<b>Список використаної літератури до Розділу 1 .....</b>	<b>53</b>
<b>РОЗДІЛ 2. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ: ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ СІТКИ ТА МОДЕЛІ ТУРБУЛЕНТНОСТІ .....</b>	<b>56</b>
<b>2.1. Математичне моделювання .....</b>	<b>56</b>
<i>2.1.1 Система визначальних рівнянь.....</i>	<i>56</i>
<i>2.1.2 Граничні умови .....</i>	<i>59</i>
<b>2.2 Чисельне моделювання.....</b>	<b>59</b>
<i>2.2.1 Вибір методу розв'язання .....</i>	<i>59</i>
<i>2.2.2 Геометрія розрахункової області.....</i>	<i>61</i>
<i>2.2.3 Розрахункова сітка.....</i>	<i>62</i>
<i>2.2.4 Чисельна модель .....</i>	<i>64</i>
<i>2.2.4.1 Дискретизація системи визначальних рівнянь .....</i>	<i>64</i>
<i>2.2.4.2 Методи розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь .....</i>	<i>68</i>
<b>2.3 Верифікація сіткової моделі: теплообмін.....</b>	<b>68</b>
<b>2.4 Обґрунтування моделі турбулентності.....</b>	<b>70</b>



Висновки до Розділу 2 .....	73
Список використаної літератури до Розділу 2 .....	74
<b>РОЗДІЛ 3. ТЕПЛООБМІН І АЕРОДИНАМІКА БІЛЯ ОДИНОЧНОЇ КОНІЧНОЇ ДИМОВОЇ ТРУБИ, ВПЛИВ ІНФРАСТРУКТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА .....</b>	<b>80</b>
3.1 Геометрична та комп'ютерна моделі.....	80
3.2 Програма досліджень .....	81
3.3 Теплообмін і аеродинаміка близько конусної труби .....	82
3.3.1 Рівномірний профіль швидкості .....	82
3.3.2 Вплив інфраструктури навколишнього простору .....	88
Висновки до Розділу 3 .....	89
Список використаної літератури до Розділу 3 .....	90
<b>РОЗДІЛ 4. ТЕПЛООБМІН ТА АЕРОДИНАМІКА БІЛЯ ОДИНОЧНОЇ КОНІЧНОЇ ДИМОВОЇ ТРУБИ: ВПЛИВ ІНФРАСТРУКТУРИ ТЕС.....</b>	<b>92</b>
4.1 Типова інфраструктура ТЕС .....	92
4.2 Геометрична та комп'ютерна моделі майданчика ТЕС. Граничні умови.....	96
4.3 Програма досліджень .....	99
4.4 Результати дослідження та їх аналіз. ....	100
4.4.1 Північний напрямок вітру. ....	100
4.4.2 Південний напрямок вітру.....	106
4.4.3 Східний напрямок вітру. ....	111
4.4.4 Західний напрямок вітру.....	115
4.5 Порівняльний аналіз тепловіддачі біля конічної димової труби..	119
Висновки до Розділу 4 .....	120
Список використаної літератури до Розділу 4 .....	121
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>123</b>
<b>ДОДАТОК А.....</b>	<b>125</b>

## ВСТУП

### Актуальність роботи

Енергетика є однією із ключових складових економіки України та забезпечує стійку роботу багатьох галузей промисловості. До 2022 року сумарна встановлена потужність електричних станцій України перевищувала 50 ГВт, у тому числі потужність теплових електростанцій (ТЕС) становила понад 54%, а атомних – понад 25%. Що стосується власне виробництва електроенергії, то атомні електростанції виробляли до 50% електроенергії (а деякі роки більше 50%), в свою чергу теплові – трохи більше 30%. При цьому теплова енергетика України створювалася в 60–70 рр. ХХ століття, за багатьма показниками теплові електростанції морально застаріли, більшість із них перевищили визначений ресурс (100 тис. год), вони часто зупиняються через аварії або для виконання ремонтних робіт. Основним паливом ТЕС було вугілля (антрацит, вугілля марки Г), яке видобувається в Україні; в окремих випадках використовувався мазут і природний газ (для «підсвічування» при запуску котла). З початком бойових дій у 2022 р. частина теплових електростанцій припинила експлуатацію, тому основне навантаження лягло на атомну енергетику, яка продовжує працювати в екстремальних умовах та з повним навантаженням. Нестача електроенергії постійно поповнюється за рахунок її імпорту з енергосистеми Європи.

Як правило, на теплових станціях продукти згоряння, що утворюються під час спалювання палива, виводяться через димову трубу, яка є важливим компонентом інфраструктури ТЕС. Вона має виводити продукти згоряння далеко поза межі станції. Оскільки концентрація шкідливих продуктів, що надходять в атмосферу обернено пропорційна квадрату висоти труби, то зростання одиничної потужності ТЕС супроводжується збільшенням висоти

димових труб. Тому висота труби на сучасних ТЕС становить кілька сотень метрів.

У тепловій енергетиці України найчастіше використовуються монолітні залізобетонні димові труби. Залізобетонний стовбур має форму порожнистого конуса, для потужних ТЕС зовнішній діаметр стовбура в гирлі труби може становити 5–16 м, а біля основи – до 36 м. Типові умови експлуатації димових труб характеризуються такими умовами: температура газу на рівні 80–180°C, вологість – до 100%, швидкість руху газу всередині труби 0,5–12 м/с залежно від теплового навантаження котла. Точка роси газів становить 100–60°C. Зі збільшенням висоти труби термін її експлуатації знижується: наприклад, для труби висотою 120–150 м він становить 45–50 років. Для захисту внутрішньої поверхні труби від агресивного впливу димових газів використовується футерування (цегла, спеціальний бетон). Вибір висоти та конструкції димової труби залежить від потужності та кількості котлоагрегатів, виду та характеристик палива, що спалюється.

Експлуатація монолітних залізобетонних димових труб ТЕС часто супроводжується випаданням конденсату на внутрішній поверхні труби, що призводить до негативних змін і поступової деградації її конструкції. Небажане випадання конденсату обумовлено багатьма причинами, основні з яких: а) вміст водяної пари в продуктах згоряння, концентрація якого залежить від виду палива, що використовується, і коефіцієнта надлишку повітря, б) режим експлуатації котла – утворення конденсату посилюється при зниженні навантаження котла, за рахунок зниження температури та витрати димових газів; в) недоліки проектних робіт та конструкторських рішень, які не повною мірою враховують особливості внутрішньої та зовнішньої аеродинаміки та теплообміну димової труби. Значний вплив на випадання конденсату надають системи утилізації теплоти газів, що відходять, особливо при глибокому охолодженні газів. Останній фактор є

стримуючим фактором застосування сучасних енергозберігаючих технологій на ТЕС, незважаючи на те, що вони дають значний економічний ефект.

Конденсат, що випав, має кислу реакцію: при спалюванні газоподібного палива показник водню  $pH$  конденсату становить 4–6, а при спалюванні рідкого палива –  $pH < 7$ . Тому на внутрішній поверхні труби виникає корозія, яка призводить до пошкодження захисного шару труби, корозії арматури, зниження газощільності та міцності футерування. Як показує практика, внутрішнє футерування труби виходить з ладу приблизно через 5-10 років після введення труби в експлуатацію.

З іншого боку, частина конденсату через шви бетонування надходить усередину труби. Для виключення цього явища тиск у газовідвідному тракті труби має бути меншим за тиск навколишнього середовища. Одним із способів вирішення цієї проблеми стали нові конструктивні рішення, такі як димарі типу «труба в трубі», багатоствольні димові труби, труби з вентильованим зазором, труби з двошаровою конструкцією.

Зовнішнє обтікання димової труби вітром характеризується великими значеннями числа Рейнольдса ( $Re_d = w \cdot d / \nu$ ). При швидкості вітру 2 м/с число Рейнольдса перевищує  $2 \cdot 10^6$ , а при швидкості вітру більше 20 м/с –  $Re_d > 2 \cdot 10^7$ . Такі параметри відносяться до транскритичного режиму обтікання, який недостатньо вивчений. В даний час відомі лише кілька робіт з теплообміну та аеродинаміки при великих числах Рейнольдса при поперечному обтіканні круглого циліндра, а прямі вимірювання на димових трубах практично відсутні. Це виключає об'єктивну оцінку умов роботи димарів ТЕС, так як аеродинаміка і теплообмін безпосередньо впливають на технічний стан і надійність експлуатації димових труб ТЕС.

Аеродинамічні та теплові розрахунки відіграють важливу роль у проектуванні димових труб. Завдання аеродинамічного розрахунку газовідвідного тракту полягає у визначенні різниці статичних тисків між

внутрішньою та зовнішньою поверхнею труби. Тепловий розрахунок повинен забезпечити мінімальний рівень термічних напруг та деформацій, які визначаються температурним режимом труби та властивостями матеріалів, що застосовуються. Згідно з конструктивними документами, температура внутрішньої поверхні труби не повинна перевищувати 100°C, а перепад температури по футеровці з кислототривкої цегли повинен бути не більше 80°C.

Розрахунок внутрішнього теплообміну не викликає великих труднощів. Тут застосовуються відомі рівняння конвективного теплообміну для турбулентного потоку в трубах з урахуванням шорсткості поверхні футеровки і випромінювання газового або запиленого потоку. Розрахунок зовнішнього теплообміну є найважчою проблемою, оскільки обтікання димової труби характеризується відривними течіями, а також змішаним режимом обтікання з ламінарною областю в передній частині труби. Розрахунок зовнішнього теплообміну виконується за середнім коефіцієнтом тепловіддачі на поверхні труби без урахування складного характеру розподілу коефіцієнта тепловіддачі по периметру труби, не повною мірою враховується конусність димової труби. Тому для розрахунку використовується просте рівняння, засноване на поперечному обтіканні круглої труби:  $\alpha = 7.3 w_0^{0.66}$ , яке дає недостатньо точні дані щодо розподілу температури за товщиною труби та умови випадання конденсату на внутрішній поверхні труби.

Важливим аспектом розрахунку зовнішнього теплообміну та аеродинаміки є вплив інфраструктури навколишнього простору (міська, сільська або відкрита місцевість, морське узбережжя), залежить від стану атмосфери. Значний вплив на аеродинаміку та теплообмін димової труби надає інфраструктура промислового майданчика ТЕС. Отже, багато питань зовнішньої аеродинаміки та теплообміну вивчені поки що недостатньо і вимагають подальшого дослідження.

Враховуючи вищенаведене, а також практичні вимоги, **мета цього дослідження** формулюється наступним чином: *Дослідити аеродинаміку та локальний теплообмін на зовнішній поверхні конічної димової труби ТЕС при поперечному обтіканні з урахуванням інфраструктури навколишнього простору та промислового майданчика ТЕС, напрямку вітру, його швидкості та температури.* На цій основі сформулювати практичні пропозиції щодо розрахунку зовнішньої аеродинаміки та теплообміну димових труб ТЕС.

Враховуючи складний характер проблеми, що розглядається, у роботі використано теоретичний підхід, заснований на чисельному розв'язанні задач зовнішньої аеродинаміки та теплообміну при обтіканні конічної димової труби незтиснутим турбулентним газом (повітрям) із використанням комерційного програмного пакету ANSYS 2020-R1 (ліцензованого для ІТТФ НАН України).

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами:**

Дисертаційна робота виконувалась у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та в Інституті технічної теплофізики НАН України відповідно до цільової програми наукових досліджень відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України, код 6541230.

#### **Мета роботи та завдання досліджень**

Метою роботи є теоретичне дослідження аеродинаміки та локального теплообміну на зовнішній поверхні конічної димової труби ТЕС при поперечному обтіканні з урахуванням напрямку вітру, його швидкості та температури, інфраструктури навколишнього простору та промислового майданчика ТЕС.

**Для досягнення мети роботи поставлено наступні завдання**

1. Виконати огляд наукової літератури за темою дослідження і визначити основні проблеми аеродинаміки та теплообміну, умов експлуатації та проектування димових труб ТЕС.

2. Розробити комп'ютерну програму розрахунку аеродинаміки та теплообміну біля зовнішньої поверхні конічної димової труби при поперечному обтіканні з урахуванням профіля швидкості набігаючого потоку повітря, інфраструктури навколишнього простору і структури майданчика ТЕС; виконати верифікацію програми та обґрунтувати вибір моделі турбулентності.

3. Виконати розрахунки і узагальнити результати чисельного моделювання зовнішньої аеродинаміки і локального теплообміну біля одиночної конічної вертикальної труби в нескінченному просторі з рівномірним профілем швидкості вітру, а також з урахуванням інфраструктури навколишнього простору.

4. Обґрунтувати геометричну модель майданчика ТЕС, створити її комп'ютерну модель. Виконати розрахунки і узагальнити результати чисельного моделювання зовнішньої аеродинаміки і теплообміну для одиночної конічної вертикальної труби в умовах спільного впливу інфраструктури навколишнього простору та промислового майданчика ТЕС.

5. Виконати порівняльний аналіз локального теплообміну на зовнішній поверхні конічної димової труби для майданчика ТЕС, дослідженого у цій роботі. Підготувати пропозиції щодо практичного використання результатів роботи.

**Об'єкт дослідження:** одиночна конічна димова труба, розташована у нескінченному просторі, в умовах міської інфраструктури, а також на промисловому майданчику ТЕС.

**Предмет дослідження:** процеси аеродинаміки та локального теплообміну при зовнішньому обтіканні конічної димової труби, різному

напрямі вітру, його швидкості та температурі, а також з урахуванням інфраструктури навколишнього простору та промислової площадки ТЕС.

**Методи дослідження:** теоретичне дослідження на основі чисельних методів розв'язання диференціальних рівнянь руху та енергії нестиснутого потоку (комп'ютерне моделювання).

**Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:**

**Вперше:**

1. Виявлено періодичний характер зміни швидкості, тиску, температури та коефіцієнта тепловіддачі в кормовій частині конічної димової труби при її поперечному обтіканні для різних граничних умов.

2. Показано, що для труби у нескінченному просторі з рівномірним профілем швидкості вітру на вході конусність труби не впливає на середню по висоті труби тепловіддачу. Зі зростанням швидкості набігаючого потоку середній коефіцієнт тепловіддачі зростає практично лінійно – як при рівномірній, так і при змінній по висоті трубі швидкості потоку.

3. Показано, що інфраструктура міського простору та промислового майданчика ТЕС має істотний вплив на локальну тепловіддачу димової труби ТЕС, що зумовлено впливом шару біля земної поверхні на граничні умови, відривними та тривимірними течіями.

4. Виконано дослідження та отримано нові результати, що характеризують аеродинаміку та теплообмін біля зовнішньої поверхні димової труби за умов сумісного впливу інфраструктури міського простору та промислового майданчика ТЕС.

**Удосконалено:**

5. Методичні рекомендації щодо комп'ютерного моделювання аеродинаміки та локального теплообміну на зовнішній поверхні одиночної



конічної труби при її поперечному обтіканні в умовах міського простору та промислового майданчика ТЕС.

6. Методика розрахунку локального теплообміну на зовнішній поверхні конічної димової труби при сумісному впливі швидкості, температури та напрямлення потоку вітру з урахуванням інфраструктури міського простору та промислового майданчика ТЕС.

#### **Набуло подальшого розвитку:**

7. Більш глибоке розуміння фізичного механізму процесів аеродинаміки та локального теплообміну при поперечному обтіканні одиночної конічної димової труби, розташованій в міській інфраструктурі та на майданчику ТЕС.

8. Розуміння, що умови експлуатації димової труби ТЕС (розташування, напрям вітру, інфраструктура навколишнього простору та промислового майданчика ТЕС) мають суттєвий вплив на аеродинаміку димової труби та повинні враховуватися при розрахунку зовнішнього теплообміну.

#### **Практичне значення результатів, представлених у дисертації:**

1. Отримані в роботі результати формують більш точні та обґрунтовані рекомендації в частині графіка режиму роботи нових димових труб, а також димових труб, що знаходяться в експлуатації ТЕС, вони також можуть використовуватися для оцінки залишкового ресурсу димової труби з урахуванням деградації її внутрішнього стану у процесі експлуатації. Отримані результати використані у науковій роботі «Розроблення методів і засобів підвищення експлуатаційної надійності та екологічної ефективності димових труб теплоенергетичних установок» (договір № 1-102/02, тема № 1.7.1.890) в рамках Цільової програми наукових досліджень Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України, реєстраційний № 0120U101123.

2. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення математичних моделей під час комп'ютерного моделювання зовнішньої аеродинаміки та теплообміну при поперечному обтіканні конічної димової труби за складних граничних умов.

### **Особистий внесок здобувача**

У дисертаційній роботі представлені результати теоретичних досліджень, у яких здобувач виконала наступні задачі:

1. Брала участь в розробці, верифікації та тестуванні процесу чисельного моделювання (із використанням програмного пакета ANSYS 2020-R1) аеродинаміки і локального теплообміну біля конічної димової труби за різних граничних умов.

2. Проводила аналіз та узагальнення результатів чисельного (комп'ютерного) моделювання, виявила, що форма димової труби слабо впливає на середню за висотою труби тепловіддачу.

3. Дисертант брала активну участь в обговоренні отриманих результатів щодо впливу інфраструктури міського простору та майданчика ТЕС на розподіл швидкості, статичного тиску, температури та коефіцієнта тепловіддачі по висоті димової труби.

4. Підготовка матеріалів для висвітлення результатів роботи у фахових і міжнародних наукових журналах та тез доповідей на українських та міжнародних наукових конференціях відбувалась спільно зі співавторами. Здобувач представляла результати наукової роботи на конференціях у формі усних (онлайн) доповідей.

### **Апробація результатів дисертації**

За матеріалами дисертації опубліковано 12 наукових робіт, у тому числі: 1 стаття у міжнародному науковому журналі (Scopus), 2 статті у фахових вітчизняних журналах категорії Б за спеціальністю 105, 3 статті у фахових

вітчизняних журналах категорії Б за тематикою дослідження, 6 тез доповідей на українських та міжнародних наукових конференціях.

Матеріали дисертаційної роботи, що представлені публікаціями у наукових журналах, які входять до переліку наукових фахових видань України категорії Б та ті в які можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії та тих, що входять до періодичних наукових видань, проіндексованих у базі Scopus:

**Scopus:**

1. A. A. Khalatov, O. V. Shikhabutinova, A. P. Chyrkova, Aerodynamics and Heat Transfer Near the Conical Chimney Placed on the Thermal Power Station Site Systems, *Decision and Control in Energy V*, pp 327–354, 08.08.2023. SSDC, Vol. 481. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_17)

**Фахові журнали категорії Б за спеціальністю:**

2. А. П. Чиркова, «Проблеми аеродинаміки та теплообміну в поперечному потоку одиночної конічної труби на площадці ТЕС» (фаховий журнал категорії Б), *Вісник Черкаського університету: фізико-математичні науки*, т.1, №1, 2022.

<https://doi.org/10.31651/2076-5851-2022-77-94>

3. А. П. Чиркова, «Методика числового моделювання аеродинаміки і теплообміну при поперечному обтіканні круглого циліндра» (фаховий журнал категорії Б), *журнал «Наукові нотатки»*, Луцький національний технічний університет, №76, с. 210 – 213, 2023.

<https://doi.org/10.36910/775.24153966.2023.76.31>

Матеріали дисертаційної роботи представлені у вигляді доповідей на міжнародних/вітчизняних наукових конференціях:

4. А. А. Халатов, Г. В. Коваленко, В. С. Олійник, А. П. Ільченко, «Особливості димових труб сучасних ТЕС», XVII Міжнародної науково-

технічної конференції «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування», Харків, 27–28 квітня, НТУ «ХП», Харків, с. 59-61, 2021, ISBN 978-617-7476-56-5. Доступно: <http://web.kpi.kharkov.ua/turbine/wp-content/uploads/sites/100/2021/04/Programma-konferentsii-2021-2.pdf>

5. А. А. Халатов, Г. В. Коваленко, В. С. Олійник, О. В. Шіхабутінова, А. П. Ільченко, «Вплив інфраструктури навколишньої поверхні на теплообмін і аеродинаміку конічної димової труби ТЕС». Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування», Харків, 27–28 квітня, НТУ «ХП», с. 62-63, 2021, ISBN 978-617-7476-56-5. Доступно: <http://web.kpi.kharkov.ua/turbine/wp-content/uploads/sites/100/2021/04/Programma-konferentsii-2021-2.pdf>

6. А. Р. Chyrkova, О. Yu. Chygai, V. S. Oliinyk «Environmental impact of the surrounding surface on heat transfer aerodynamics of conical chimney thermal power station», *Young researchers in the global world: Approaches and challenges*, National university of urban economy in Kharkiv, The 2021 international forum for young researchers, April 23, 2021, kharkiv –o. m. beketov nuue, 202. <https://www.kname.edu.ua/index.php/ru/events/vii-forum-for-young-researchers-%E2%80%9CYoung-researchers-in-the-global-world-achievements-and-challenges%E2%80%9D>

7. А. А. Халатов, Г. В. Коваленко, О. В. Шіхабутінова, А. П. Чиркова, «Особливості аеродинаміки димових труб сучасних теплових електростанцій». XIX всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики», Київ, 13 – 14 травня, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», с. 128-130, 2021. Доступно: <https://drive.google.com/file/d/1ss8jfEjQt0yn6YHafNJREZW5UqT2W55p/view>

8. А. П. Чиркова, А. А. Халатов, О. В. Шіхабутінова, «Вплив інфраструктури ТЕС на теплообмін і аеродинаміку навколо димової труби», *Восьмої Міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерна гідромеханіка»*, 27-28 вересня 2022 р., Інститут гідродинаміки НАН України,

м. Київ,

Україна.

С. 91–92.

Доступно:

[http://hydromech.org.ua/content/pdf/ccfd/CompHydroMech\\_2022.pdf](http://hydromech.org.ua/content/pdf/ccfd/CompHydroMech_2022.pdf)

9. А. П. Чиркова, М. А. Данилов, А. А. Халатов, «Теплові процеси та аеродинамічні властивості біля конічної вертикальної димової труби на майданчику теплової електростанції», *XXI Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики»*, 11–12 травня 2023 р., «КПІ ім. Ігоря Сікорського», с. 110–116, м. Київ.

Статті у фахових вітчизняних журналах категорії Б за тематикою дослідження:

10. А. П. Чиркова, А. А. Халатов, В. С. Олійник, О. В. Шихабутінова, «Аеродинаміка та теплообмін одиночної конічної труби при зовнішньому обтіканні» (фаховий журнал категорії Б), *Теплофізика та теплоенергетика*, 43(4), с. 25-31, 2021.

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.3>

11. А. П. Чиркова, А. А. Халатов, «Теплообмін та аеродинаміка біля вертикальної конічної труби на майданчику ТЕС» (фаховий журнал категорії Б), *Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, 2022, № 1(9), С. 58-63.

<https://doi.org/10.20998/2078-774X.2022.01.07>

12. О. В. Шихабутінова, А. П. Чиркова. «Аеродинаміка повітряного потоку поблизу конічної димової труби на майданчику теплової електростанції» (фаховий журнал категорії Б), *журнал «Теплофізика та теплоенергетика»*, Інститут технічної теплофізики НАН України, 47(4), с. 51-59, 2022.

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2022.6>

## Структура та обсяг роботи

У *першому розділі* наведено короткий огляд сучасного стану проблеми. Розглянуто основні конструкції димових труб у теплоенергетиці, проаналізовано основні проблеми їх експлуатації, пов'язані, головним чином з випаданням хімічно агресивного конденсату, що призводить до поступової деградації внутрішньої поверхні димових труб та порушення екологічно безпечних умов експлуатації. Детально розглянуто особливості аеродинаміки та теплообміну при поперечному обтіканні круглого нескінченного циліндра для критичного, надкритичного та трансзвукового режимів обтікання (при великих числах Рейнольдса). Аналізується вплив зовнішньої турбулентності та шорсткості поверхні на теплообмін та аеродинаміку при докритичному режимі обтікання циліндра. Розглянуто особливості обтікання димової труби та окремих будівель на майданчиках АЕС та ТЕС за різного напрямку вітру. Наводиться рівняння, що характеризує профіль швидкості набігаючого вітру для трьох типів інфраструктури навколишнього простору. Сформульовано мету роботи та обґрунтовано основні завдання для дослідження.

У *другому розділі* розглянуто методичні аспекти комп'ютерного моделювання аеродинаміки та теплообміну при зовнішньому обтіканні одиночної конічної труби. Наводиться математичний опис проблеми, розглянуто геометричні моделі розрахункової області, аналізуються особливості задання граничних умов. Обґрунтовано вибір чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь руху та енергії. Для такого підходу розглянуто деталі дискретизації системи рівнянь та методи розв'язання системи алгебраїчних рівнянь. На прикладі теплообміну при докритичному режимі обтікання круглого циліндра виконано верифікацію сіткової моделі та обґрунтовано застосування моделі турбулентності.

У *третьому розділі* виконано комп'ютерне моделювання аеродинаміки та теплообміну на поверхні одиночної конічної димової труби, розташованої у нескінченному просторі, а також у міській інфраструктурі. Запропоновано

геометричну та комп'ютерну моделі димової труби, розглянуто методичні аспекти моделювання та представлено програму досліджень. Вперше в роботі виявлено, що при рівномірному профілі швидкості перед трубою в її кормовій області при поперечному обтіканні формується періодична зміна швидкості, температури, статичного тиску та локального коефіцієнта тепловіддачі по висоті труби. Максимальні значення тепловіддачі досягаються в середній частині труби, біля земної поверхні та у гирлі труби. Виявлено, що конусність труби практично не впливає на середню по всій висоті труби тепловіддачу. Форма профіля швидкості вітру перед димовою трубою, яка визначається типом інфраструктури навколишнього простору, має значний вплив на локальну тепловіддачу труби. Зі зростанням середньої швидкості потоку вітру середня по висоті труби тепловіддача зростає приблизно за лінійним законом.

У *четвертому розділі* розглянуті аеродинаміка та теплообмін біля одиночної конічної димової труби, розташованої в умовах промислового майданчика ТЕС. Для виконання досліджень розроблено спрощену геометричну та комп'ютерну моделі майданчика ТЕС, які враховують основні елементи її інфраструктури. На поверхні труби задавалися граничні умови І роду, а в розрахунках використана RNG  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентності. Програма досліджень включає різний напрямок вітру та різні сезонні температурні умови, притаманні Україні. На межах майданчика задавався профіль швидкості, який відповідає умовам міської забудови на кордонах майданчика. Показано, що інфраструктура майданчика ТЕС та профіль швидкості на межах майданчика істотно впливають на умови обтікання димової труби та тепловіддачу на рівні, нижчому за межу даху машзалу. У цьому випадку зона з періодичною зміною швидкості, температури, тиску та теплообміну присутня тільки в зоні труби вище даху машзалу. Показано, що використання у розрахунках рівняння для рівномірного профілю швидкості може призводити до значних помилок у розрахунках тепловіддачі. У

приземній зоні труби та в області машзалу тепловіддача може бути як заниженою, так і завищеною порівняно з результатами розрахунку, а вище будівлі машинного залу це рівняння показує завищені результати. Виконано порівняльний аналіз розподілу локальної тепловіддачі по висоті труби при різному напрямку вітру.



## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

### 1.1 Димові труби в теплоенергетиці

Димова труба – це складна інженерна конструкція, яка знаходиться в непростих природних умовах, таких як сильний вітер та різкі температурні коливання. Димова труба ТЕС повинна витримувати високі значення температури і вплив агресивних хімічних сполук, які утворюються в димових газах. На жаль, більшість димових труб теплових електростанцій України знаходяться в незадовільному стані та працюють в таких умовах без проведення належних ремонтних робіт. Така ситуація призводить до неякісної роботи димових труб і їх ще більшу руйнацію та викид шкідливих речовин на більш низьких висотах через тріщини та інші дефекти. На рисунку 1.1 на прикладі Добротвірської ТЕС [1] можна побачити руйнування внутрішньої конструкції димової труби.

Для підвищення надійності захисту димової труби від агресивних газів між оболонкою та футеровкою виконується вентиляційна щілина товщиною 200–400 мм. За допомогою вентилятора в неї подається повітря, нагріте в парових калориферах до 60–80°C [2].

#### *1.1.1 Основні конструкції димових труб ТЕС*

Димові труби теплових електростанцій можуть бути сконструйовані з декількох матеріалів, наприклад, із цегли, залізобетонні конструкції або металеві конструкції (зазвичай це сталь). Орієнтовно, димові труби ТЕС можна розділити наступним чином [3]:

- 1) димові труби з цегляною футеровкою;
- 2) димові труби з вентиляційним зазором;
- 3) димові труби двошарової конструкції.



а)



б)



в)

**Рисунок 1.1. – Пошкодження димової труби Добротвірської ТЕС (а, б);  
випад конденсату всередині димової труби (в)<sup>1</sup>**

Всі вимоги до будівництва димових труб повинні відповідати ДСТУ Б EN 13084-1:2014 «Труби димові, які розташовані окремо».

Димова труба будь-якої ТЕС поділяється на дві частини: несучу частину (наприклад, металеві решітки у вигляді башні або залізобетонної конструкції циліндричної форми) та газовідвідну частину. Газовідвідна частина зазвичай будується посекційно (одна секція приблизно 10–15 м) та прикріплюється до несучої конструкції. Всі матеріали повинні бути стійкі до корозії та перепаду температур.

Форма труби може бути циліндричною або конічною. Як сказано у роботі [3], діаметр та висота труби повинні проектуватися з урахуванням аеродинамічних та теплових навантажень, а також з урахуванням екологічної

<sup>1</sup> Фото з [1]

безпеки навколишнього середовища. Оскільки через димову трубу ТЕС в атмосферу виводяться продукти горіння, що містять шкідливі речовини, серед яких діоксид сірки ( $\text{SO}_2$ ) та оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ), потрібно дотримуватися екологічних норм, що прописані в наказі Міністерства енергетики та вугільної промисловості України № 543 від 04.08.2014 р. про затвердження «Норм технологічного проектування енергетичних систем і електричних мереж 35 кВ і вище». Мінімальні діаметри димових труб слід розраховувати з урахуванням устаткування, яке застосовується при зведенні труб, але не менше 1,2 м – для цегляних труб (у просвіті по футеровці) і 3,6 м – для монолітних залізобетонних [4]. Димові труби, що виготовляються із цегли, мають структуру однорідного стовпа. Тобто димові гази потрапляють від усіх працюючих котлів в один простір димової труби. Надлишковий тиск в такій димовій трубі може бути більше 200 Па.

У цій дисертаційній роботі в якості об'єкта дослідження вибрана цегляна димова труба конічної форми – як найбільш розповсюджена конструкція труби на українських ТЕС.

### ***1.1.2 Проблеми експлуатації***

Проектування та експлуатація димових труб є достатньо складною інженерно-технічною проблемою. Недостатньо точне проектування спричиняє охолодження газів і випадіння агресивних продуктів в рідкій фазі всередині труби, які поступово руйнують її внутрішню поверхню, формуючи щілини та отвори. В результаті димові гази дифундують через оболонку і цеглу та охолоджуються всередині стінки труби. Внаслідок цього має місце випадіння агресивного конденсату, який може замерзнути взимку, що призводить до руйнування як футерування, так і бетонної оболонки [3]. Через незадовільний стан димових труб спостерігається викид шкідливих речовин на різній висоті димової труби.

Доволі часто причиною випадіння конденсату всередині труби є недостатньо точний розрахунок термогазодинаміки потоку всередині труби. Це зумовлено тим, що розрахунки теплообміну та аеродинаміки потоку мають ряд обмежень. По-перше, розрахунки зовнішнього теплообміну та аеродинаміки проводяться на основі рівнянь для циліндричної труби – без урахування її конусності [5]. Надмірні похибки з'являються при використанні недостатньо надійних граничних умов на зовнішній поверхні труби (коефіцієнт тепловіддачі) в умовах впливу інфраструктури навколишнього простору і майданчика ТЕС.

Умови, що сприяють накопиченню конденсату в димовій трубі, можуть також бути наслідком відхилення режиму роботи ТЕС від розрахункового до зниження навантаження на теплову електростанцію [6]. При зниженні навантаження – тобто зменшення температури вихідних газів у котлі та внаслідок цього зниження швидкості їхнього переміщення по димовій трубі – збільшується відносна вологість газів, що призводить до утворення конденсату. Якщо ж зменшити навантаження до критичного рівня – тобто коли гази охолоджуються до температури нижче точки роси водяної пари – це призводить до випадіння конденсату всередині димової труби, що у свою чергу призводить до проблем експлуатації димової труби та безпеки ТЕС в цілому [7].

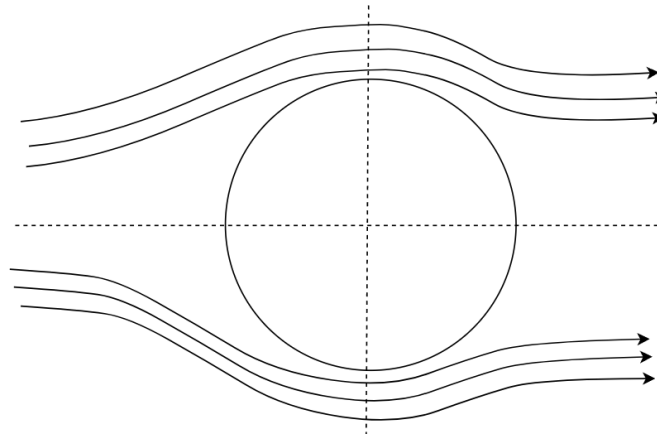
## **1.2 Фізика поперечного обтікання круглого циліндра**

### ***1.2.1 Гідродинаміка***

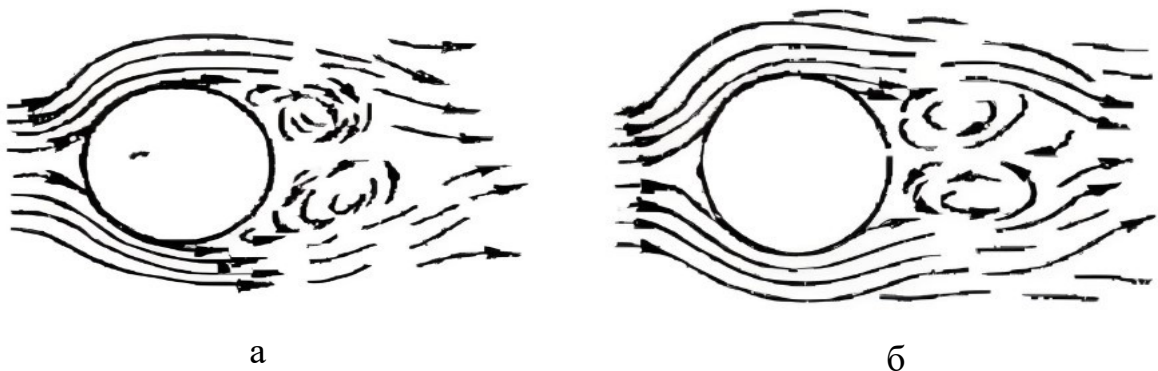
Обтікання димової труби характеризується більшими числами Рейнольдса (що перевищують  $10^7$ ) [3]. Експериментальні дані для димової труби в цьому діапазоні практично відсутні. Тому в якості першого наближення зовнішньої аеродинаміки і теплообміну конічної димової труби

ТЕС розглянемо поперечне обтікання круглого циліндра, яке добре представлено у багатьох наукових публікаціях [8]–[12], [16]–[18].

При зовнішньому обтіканні круглого циліндра в залежності від швидкості набігаючого потоку структура потоку буде мати різний характер. При значеннях числа Рейнольдса  $Re_d < 5$  відбувається плавне, безвідривне обтікання циліндра (рис. 1.2). Пограничний шар на передній поверхні труби відривається від поверхні з формуванням двох симетричних вихорів позаду циліндра. При подальшому підвищенні швидкості потоку вихори за трубою витягуються і відриваються від труби, створюючи вихрову дорожку (рис. 1.3).



**Рисунок 1.2 – Безвідривне огинання круглого циліндра набігаючим потоком повітря.**



**Рисунок 1.3 – Огинання круглого циліндра з відривом ламінарного (а) та турбулентного (б) потоку**

До значень  $Re_d \approx 10^3$  частота відриву вихору збільшується та при  $Re_d = 10^3 - 2 \cdot 10^5$  стає постійною величиною та характеризується числом Струхаля  $Sh = 0,2$ .

Власне спостереження відриву пограничного шару є наслідком підвищення тиску вздовж набігаючого потоку та сповільнення рідини твердої стінки. Підвищення тиску вздовж набігаючого потоку призводить до сповільнення руху повітря та появи зворотного руху. Такий напрямок руху течії призводить до відриву пограничного шару, внаслідок чого відбувається відрив потоку з утворенням вихорів. Такий характер і є основною особливістю поперечного обтікання круглого циліндра. При відносно невеликих значеннях числа Рейнольдса та невисокого ступеня турбулентності відрив ламінарного пограничного шару відбувається при значенні  $\varphi \approx 82^\circ$ . Кут  $\varphi$  рахується від лобової частини круглого циліндра.

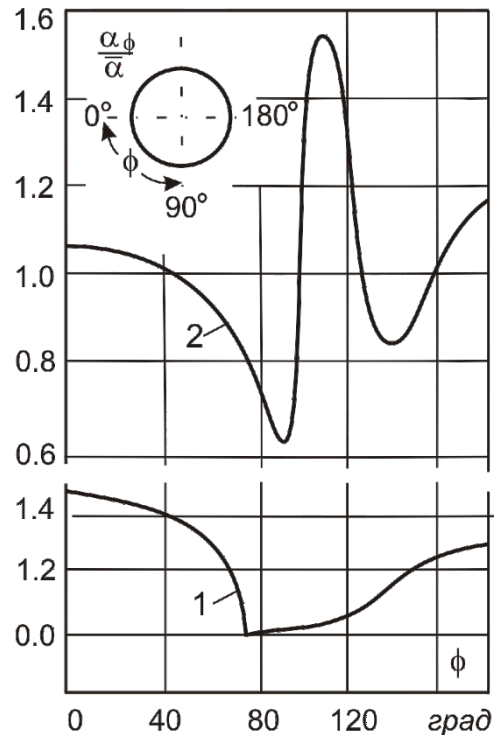
Турбулентний потік в певній ділянці пограничного шару спостерігається приблизно в діапазоні  $Re_d = 10^5 - 4 \cdot 10^5$ . Наявність турбулентного руху набігаючого потоку замість відриву пояснюється великими числами Рейнольдса, що призводить до сповільнення руху повітря та зростання тиску. Турбулентний пограничний шар має велике значення кінетичної енергії, тому відрив турбулентного потоку спостерігається при значеннях  $\varphi \approx 140^\circ$ . Зміщення зони відриву призводить до зменшення вихрової зони позаду круглого циліндра.

### ***1.2.2 Локальний і середній теплообмін***

Специфічний характер обтікання круглого циліндра, що описано вище, має значний вплив на його тепловіддачу. На рисунку 1.4 показано зміну коефіцієнта тепловіддачі по колу циліндра. Лінія 1 відповідає відриву пограничного шару при ламінарному режимі, а лінія 2 – відриву турбулентного пограничного шару.

Кормова частина циліндра огинається повітрям, що має вихровий характер руху. При малих значеннях числа Рейнольдса тепловіддача в

кормовій частині круглого циліндра має невеликі значення, проте зі збільшенням  $Re$  тепловіддача теж збільшується та може досягати значень тепловіддачі лобової частини циліндра.



**Рисунок 1.4 – Зміна коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_\phi/\alpha$ .**

**1 – тепловіддача при відриві ламінарного пограничного шару;**

**2 – тепловіддача при відриві турбулентного пограничного шару.**

На лінії 2 можна спостерігати два мінімальних значення. Перший мінімум відповідає переходу ламінарної течії в турбулентну. В цьому випадку значення коефіцієнта тепловіддачі різко підвищується. Другий мінімум відповідає відриву турбулентного пограничного шару. Перед відривом зменшення тепловіддачі пов'язане зі збільшенням товщини пограничного шару. За місцем відриву циліндр обтікається вихрами та спостерігається підвищення тепловіддачі.

Потрібно зазначити, що при зовнішньому обтіканні димової труби варто враховувати великі значення чисел Рейнольдса, що становлять більше  $10^6$

(закриті та транскритичні режими обтікання труби). Проаналізувавши літературні джерела [15], [19], [24], можна прийти до висновку, що робіт, посвячених вирішенню цього питання, недостатньо.

Так як надійні дані по поперечному обтіканню конічної поверхні практично відсутні, то в розрахунках середнього теплообміну  $\alpha_0$  використовується формула для круглого циліндра [3]:

$$\alpha_0 = 7.3 \cdot w_x^{0.66}, \quad (1.1)$$

де  $w_x$  – середня швидкість набігаючого потоку.

Тепловіддача в лобовій частині циліндра буде залежати від властивостей набігаючого потоку (турбулентний, ламінарний). В роботі [19] проведено порівняння теоретичних та практичних розрахунків місцевої тепловіддачі при поперечному обтіканні круглого циліндра та зроблено висновок, що при турбулентному набігаючому потоці експериментально отримані значення будуть більшими.

У роботі [23] зроблено висновок, що при значенні кута  $\varphi$  від  $3^\circ$  до  $7^\circ$  в лобовій частині циліндра з'являється пульсація переносу тепла. Проте зі збільшенням значення кута  $\varphi$  потік починає пришвидшуватися через вплив від'ємного градієнта тиску, при цьому спостерігається згасання пульсацій, та набігаючий потік переходить в ламінарний.

При описі та розрахунках місцевої тепловіддачі також потрібно враховувати температуру стінки циліндра, оскільки властивості зміни цієї температури призводять до різних значень тепловіддачі. Зміна градієнта тиску призводить до розповсюдження швидкості в гідравлічному пограничному шарі та його товщини, а зміна градієнту температури поверхні обумовлює розповсюдження температури в тепловому пограничному шарі та товщини цього шару. Зміна останнього і призводить до зміни коефіцієнта тепловіддачі, оскільки він обернено пропорційний товщині теплового прикордонного шару [19].



У роботі [19] проаналізовано залежність коефіцієнта тепловіддачі від числа Рейнольдса та встановлено наступне:

- 1) при малих значеннях числа Рейнольдса значення тепловіддачі в кормовій частині менше від тепловіддачі в лобовій частині циліндра;
- 2) при  $Re_d > 5 \cdot 10^4$  коефіцієнт тепловіддачі має більше значення від коефіцієнта тепловіддачі в кормовій частині циліндра;
- 3) При  $Re_d = 2 \cdot 10^5$  значення коефіцієнта тепловіддачі набуває іншого характеру, що пов'язано з турбулентним характером прикордонного шару.

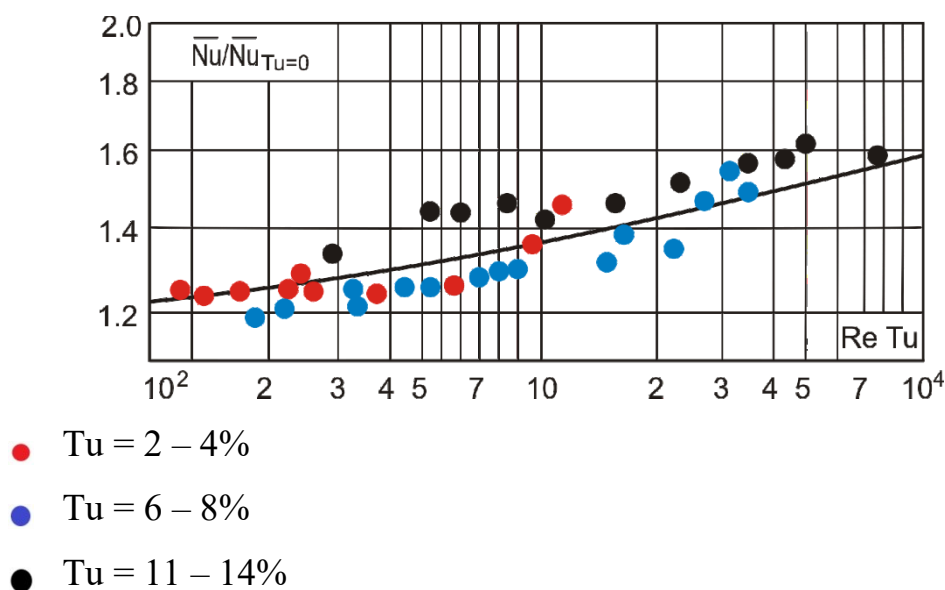
В цілому у проміжку  $Re_d = 5 - 10^3$  середнє число Нуссельта пропорційно числу Рейнольдса у ступені 0,5, у проміжку  $Re_d = 10^3 - 2 \cdot 10^5$  – ступеня 0,6 та у проміжку  $Re_d = 3 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$  – ступеня 0,8. При великих числах Рейнольдса у сфері транскритичного обтікання ( $Re_d = 1,5 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^6$ ) середнє число Нуссельта пропорційно числу Рейнольдса у ступені 1,01 [3]. У цьому режимі при  $Re_d = 4 \cdot 10^6$  відбувається значне розширення зон турбулентної та відривної течії, а розвиток пограничного ламінарного шару обмежено кутом  $\varphi = 35^\circ$ .

### ***1.2.3 Вплив степені турбулентності потоку та шорсткості поверхні***

Обтікання димової труби вітром характеризується підвищеною турбулентністю, яка визначає перехід ламінарної течії в турбулентну. Значний вплив на точку переходу (критичне число Рейнольдса) надає масштаб турбулентності, що характеризує вихорі в турбулентному потоці. При надкритичному обтіканні ( $Re_d > 4 \cdot 10^5$ ) зростання степені турбулентності від 1% до 7% призводить до зміщення точки переходу ламінарного потоку в турбулентний на 10-12%, а при збільшенні турбулентності до 15% зміщення сягає майже 50%. У цій області зростання ступеня турбулентності потоку призводить до істотного збільшення гідравлічного опору труби.

Дослідження впливу турбулентності потоку на тепловіддачу лобової частини циліндра наведено в роботах [13], [14], [20]–[22]. Встановлено, що зі збільшенням турбулентності набігаючого потоку значення тепловіддачі суттєво підвищується.

На рисунку 1.5 показано вплив турбулентності набігаючого потоку на середню тепловіддачу циліндричної труби.



**Рисунок 1.5. – Середня тепловіддача циліндра в турбулентному потоці ( поперечний перетин) [6]**

З рисунка 1.5 випливає, що при значеннях числа  $Re Tu = 100-1000$  та  $Tu \leq 14\%$ , відповідно до [3], середня тепловіддача може описуватися наступним рівнянням:

$$\overline{Nu} = \overline{Nu}_0 \cdot [1 + 0.09 \cdot (Red \cdot Tu)^{0.2}],$$

де  $\overline{Nu}_0$  – середнє число Нуссельта при відсутності зовнішньої турбулентності потоку.

Якщо набігаючий потік штучно турбулізувати, то коефіцієнт тепловіддачі зростатиме, та при цьому зміна закону теплообміну буде спостерігатися при значеннях  $Re_d \leq 10^3$ . Наприклад, при розміщенні циліндра

біля вентилятора спостерігається збільшення середньої тепловіддачі циліндра приблизно в два рази.

На аеродинаміку обтікання круглого циліндра великий вплив чинить стан поверхні. Аналіз експериментальних даних показує, що вплив шорсткості на розподіл тисків помітно виявляється в ділянці  $\varphi = 60-180^\circ$ , причому в кормовій ділянці шорсткість поверхні має слабкий вплив на коефіцієнт тиску. Зі зростанням числа Рейнольдса при постійній шорсткості поверхні зміна коефіцієнта тиску в ділянці  $\varphi > 90^\circ$  має складний характер. Можна також відзначити автомодельність коефіцієнта тиску щодо числа Рейнольдса в області  $\varphi = 0-30^\circ$  незалежно від параметрів шорсткості.

В області критичного обтікання ( $Re_d = 4,1 \cdot 10^5$ ) істотних змін у розподілі тепловіддачі шорсткої поверхні порівняно з гладкою не спостерігається. У надкритичному режимі ( $Re_d = 5,9 \cdot 10^5 - 1,9 \cdot 10^6$ ) при незмінній шорсткості та зростанні числа Рейнольдса точка ламінарно-турбулентного переходу зміщується вгору за течією, що призводить до зростання максимальних значень теплообміну в турбулентній, перехідній та відривній. Перехід у транскритичний режим обтікання характеризується зростанням теплообміну в лобовій точці, відсутністю ламінарного потоку в цій області та зростанням турбулентного прикордонного шару в  $\varphi = 0-110^\circ$ . Загалом збільшення шорсткості призводить до більш раннього руйнування ламінарного прикордонного шару вже в надкритичному режимі, а зі зростанням числа Рейнольдса теплообмін зростає у всіх зонах обтікання циліндра.

Як показують дані Achenbach, в області транскритичного режиму теплообмін на 70-74% підтримується за рахунок турбулентного прикордонного шару, і лише 26-30% тепловіддачі відбувається в області відривної течії [3]. В області  $Re_d = 10^6 - 4 \cdot 10^6$  при шорсткості циліндра  $k_s/d = 75 \cdot 10^{-5}$  середнє число Нуссельта пропорційно числу Рейнольдса в ступеню 0,98.

### 1.3 Вплив інфраструктури ТЕС на аеродинаміку одиночної димової труби

Димова труба теплової електростанції (ТЕС) може бути розташована в межах інфраструктури навколишнього простору (для невеликих об'єктів) або розташовуватися на майданчику теплової електростанції (для достатньо великих об'єктів). Ці фактори можуть значно впливати на аеродинаміку і теплообмін димової труби.

Відповідно до [3], навколишню інфраструктуру можна поділити на три категорії:

- 1) тип А – відкриті узбережжя морів, озер і водосховищ, сільські місцевості, в тому числі з будівлями висотою менше 10 м, пустелі, степи, лісостепу, тундра;
- 2) тип Б – міські території, лісові масиви та інші місцевості, рівномірно покриті перешкодами висотою більше 10 м;
- 3) тип С – міські райони з щільною забудовою будинками заввишки більше 25 м.

У роботі [3] показано, що з урахуванням навколишньої інфраструктури профіль швидкості вітру змінюється і описується наступним рівнянням:

$$w_z = w_0 \cdot k(z), \quad (1.2)$$

де  $w_z$  – швидкість на висоті  $z$  від поверхні Землі;  $w_0$  – середня швидкість набігаючого потоку (вітру);  $k(z)$  – коефіцієнт, що враховує зміну швидкості вітру з висотою  $z$  і розраховується за формулою:

$$k(z) = k_{10} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha, \quad (1.3)$$

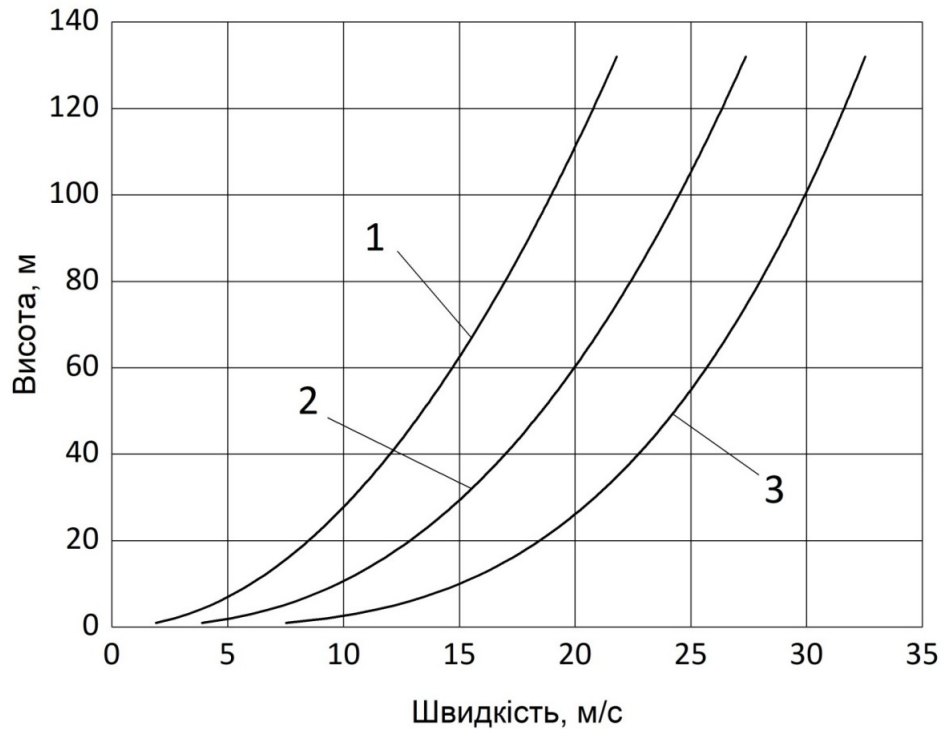
Параметри  $k_{10}$  і  $\alpha$  будуть мати різні значення в залежності від типу місцевості. Значення параметрів наведені в таблиці 1.1 [3].

Таблиця 1.1

**Типи місцевості та параметри  $k_{10}$  та  $a$  в рівнянні (1.3) [3]**

Тип місцевості	Характеристика місцевості	$k_{10}$	$a$
А	Відкриті узбережжя морів, озер і водосховищ, сільські місцевості, в тому числі з будівлями висотою менше 10 м, пустелі, степи, лісостепу, тундра	1	0,3
В	Міські території, лісові масиви та інші місцевості, рівномірно покриті перешкодами висотою більше 10 м.	0.65	0.4
С	Міські райони з щільною забудовою будинками заввишки більше 25 м.	0.4	0.5

На рисунку 1.6 показано профіль швидкості, розрахованої за рівнянням (1.2) для різних типів місцевості та при різній швидкості набігаючого потоку. При розрахунках середньої швидкості потоку  $w_0$  визначалася на відстані 22 діаметра основи труби (33800 мм).



**Рисунок 1.6 – Профіль швидкості вітру для різних типів місцевості навколишнього простору:**

**1 – тип А (швидкість набігаючого потоку 10 м/с),**

**2 – тип В (швидкість набігаючого потоку 15 м/с),**

**3 – тип С (швидкість набігаючого потоку 25 м/с).**

Звідси випливає, що профіль швидкості набігаючого потоку має нелінійний характер. На великій висоті величина швидкості навіть перевищує середню швидкість набігаючого потоку. Ця особливість повинна враховуватися при розрахунку теплообміну димової труби. Такий характер розподілу швидкості приводить до нерівномірного розподілу статичного тиску по висоті труби з максимальним значенням тиску у її основі. Це призводить до значного «перетікання потоку» вздовж труби, тобто течія має тривимірний характер.

Промисловий майданчик теплової електростанції теж має свою власну інфраструктуру. До типової інфраструктури ТЕС зазвичай входять наступні будівлі [24]:

- головний корпус;
- димові труби;
- електричні щити керування;
- електричні розподільвачі;
- системи водопостачання;
- паливний блок;
- хімічний цех;
- адміністративний корпус;
- майстерні;
- склади;
- монтажні майданчики.

В типовій компоновці ТЕС найбільшу висоту має будівля котельного відділення, яка має висоту від 40 м до 80 м в залежності від потужності котлів. Від потужності котлів залежить і висота димової труби, яка звичайно вище від котельного відділення приблизно в три рази. Близьке розташування димової труби і котельного відділення викликає появу тривимірного обтікання труби з деякою закруткою. Як правило, димова труба на майданчику ТЕС має несиметричне розташування відносно будівлі машинного залу, що матиме вплив на аеродинаміку димової труби. Відмінності такого обтікання від фронтального (перпендикулярного) набігання полягають в наступному [3]:

- 1) зона розрідження починається з кута  $\varphi = 10^\circ$ , а при перпендикулярному – при  $\varphi = 30^\circ$ ;
- 2) мінімальні значення коефіцієнту тиску при набіганні потоку під кутом, відмінним від прямого, більші, ніж при перпендикулярному приблизно в

1,5 рази;

3) мінімальні значення коефіцієнту тиску досягаються раніше, ніж при перпендикулярному – при  $\varphi = 50^\circ$ .

При обтіканні двовимірної перешкоди перед ним утворюється вихрова зона. Якщо перешкода має кінцеву довжину, то вихор в горизонтальній площині приймає тороїдальну підковоподібну форму, а течія стає тривимірною. Параметри обтікання таких перешкод як головний корпус ТЕС навіть при незначних швидкостях вітру 1 м/с і висоті корпусу  $\approx 30$  м будуть відповідати розвиненій турбулентній течії з числом Рейнольдса порядку  $Re_H \approx 2 \cdot 10^6$  [19]. По висоті труби профіль швидкості вирівнюється і на висоті  $H \approx 2 \cdot H_k$  стає практично горизонтальним, а обтікання стовбура димової труби стає подібним до двовимірного обтікання кругового циліндру [19].

Якщо вітер дме вздовж головного корпусу ТЕС, умови обтікання димової труби ускладнюються в нижній третині її стовбура. Ці зміни суттєві при відносній близькості димової труби до стіни  $b/D = 0,1$ . При відношенні  $b/D > 0,3$  вплив стіни можна не враховувати. В верхній частині димової труби в усіх випадках буде спостерігатись звичайне двовимірне обтікання кругового циліндра, крім деякої ділянки поблизу оголовка, де відбувається деформація потоку при взаємодії поперечних потоків вітру і димових газів. Максимальне розрідження фіксується у всіх перетинах труби при  $\varphi = 80^\circ$ .

В роботі [25] представлений експериментальний матеріал з моделювання обтікання вітровим потоком промислового майданчика АЕС, що складається з чотирьох моноблоків з реактором ВВЕР-1000. Фізична модель АЕС була досліджена в аеродинамічній трубі в масштабі 1:300 при початковій турбулентності потоку 0,2% і 10%. Метою цього дослідження було визначення положення аеродинамічної тіні і потрібної висоти димової труби, яка буде достатньою для забезпечення промислового майданчика теплової чи атомної електростанції від забруднення її шкідливими речовинами. Також в роботі [25] прийшли до висновку, що головний корпус



АЕС суттєво змінює параметри потоку з появою значних турбулентних течій. Перед корпусом потік повітря гальмується, а над корпусом і за ним дещо прискорюється, в тому числі і над гирлом труби. На висоті, що дорівнює подвоєній висоті корпусу  $2H_k$ , його швидкість становить до 130% від початкової незалежно від рівня початкової турбулентності. За корпусом на відстані приблизно  $2.1 H_k$  знаходиться рециркуляційна зона.

#### 1.4 Ціль та завдання

Виконаний вище аналіз показав, що димова труба ТЕС є складною інженерною спорудою, експлуатація якої вимагає врахування умов її експлуатації (повний або частковий режим), а також особливостей теплообміну та аеродинаміки всередині труби та зовні у різні пори року. Умови експлуатації димової труби регламентуються спеціальними документами, дотримання яких запобігає випаданню агресивного конденсату всередині труби. Проте у багатьох випадках ці рекомендації порушуються, що призводить до випадіння конденсату та поступового руйнування внутрішньої поверхні труби, утворення локальних щілин та надходження продуктів згоряння в атмосферу. Тим самим порушуються екологічні умови експлуатації труби у районі її встановлення.

При проектуванні димових труб слід враховувати кілька факторів, серед яких кінцева форма труби та її розташування, інфраструктура навколишнього простору та майданчика ТЕС, швидкість та напрям вітру, турбулентності потоку повітря, взаємне розташування будівель на майданчику, сезонність експлуатації та ін. Ці особливості призводять до «деформації» профіля середньої швидкості набігаючого потоку, який має нелінійний характер по висоті з мінімальним значенням швидкості біля поверхні Землі. Тому по висоті труби виникає різниця тисків та поперечний потік, спрямований до гирла труби. Таким чином, обтікання кінцевої димової

труби, навіть розташованої в нескінченному просторі (рівномірний профіль швидкості), має складний тривимірний характер.

Особливо важливий вплив на умови теплообміну всередині труби мають зовнішні граничні умови теплообміну (коефіцієнт тепловіддачі), які повинні враховуватися в локальній (а не в середній) формі, з урахуванням тривимірного зовнішнього обтікання димової труби. Виконаний аналіз показав, що такі дані в наш час практично відсутні і розрахунки теплового стану труби виконуються за рівнянням осесиметричної труби без урахування її тривимірного обтікання. З цієї причини помилки в розрахунках зовнішньої тепловіддачі можуть досягати 25% і більше, що в результаті призводить до помилок щодо умов і місця випадання вологи в трубі.

Окремою проблемою є інфраструктура майданчика ТЕС. Різне розташування будівель, їх розміри та висота мають значний вплив на розподіл аеродинаміки та теплообміну і цей факт необхідно враховувати в розрахунках. При цьому в кожному конкретному випадку розрахунок повинен виконуватися з урахуванням індивідуальних особливостей інфраструктури навколишнього простору та майданчика ТЕС, розташування димової труби на майданчику, температури, напрямку та швидкості вітру. Такі розрахунки складні та тривалі, вони вимагають у кожному конкретному випадку розв'язання системи диференціальних рівнянь гідродинаміки та теплообміну з відповідними граничними умовами.

Враховуючи вищенаведене, а також практичні вимоги, основна мета цього дослідження формулюється наступним чином: теоретичне дослідження аеродинаміки та локального теплообміну на зовнішній поверхні конічної димової труби ТЕС при поперечному обтіканні з урахуванням напрямку вітру, його швидкості та температури, інфраструктури навколишнього простору та промислового майданчика ТЕС.

Враховуючи складний характер проблеми, що розглядається, у роботі використано теоретичний підхід, заснований на чисельному вирішенні задач зовнішньої аеродинаміки та теплообміну при обтіканні конічної димової

труби незтиснутим турбулентним газом (повітрям) з використанням комерційного програмного пакету ANSYS 2020-R1 (ліцензованого для ІТТФ НАН України).

Для досягнення поставленої мети у роботі слід вирішити такі основні завдання:

1. Виконати огляд наукової літератури по темі дослідження і визначити основні проблеми аеродинаміки та теплообміну, умов експлуатації та проектування димових труб ТЕС.

2. Розробити комп'ютерну програму з врахуванням впливу на профіль швидкості набігаючого потоку повітря інфраструктури навколишнього простору і майданчика ТЕС; виконати її верифікацію та обґрунтувати вибір моделі турбулентності.

3. Виконати розрахунки і узагальнити результати чисельного моделювання зовнішньої аеродинаміки і теплообміну біля одиночної конічної вертикальної труби в нескінченному просторі (рівномірний профіль швидкості вітру), а також з урахуванням інфраструктури навколишнього простору.

4. Обґрунтувати геометричну модель майданчика ТЕС. Виконати розрахунки і узагальнити результати чисельного моделювання зовнішньої аеродинаміки і теплообміну для одиночної конічної вертикальної труби в умовах спільного впливу інфраструктури навколишнього простору та промислового майданчика ТЕС.

5. Виконати порівняльний аналіз локального теплообміну на зовнішній поверхні конічної димової труби для майданчика ТЕС, дослідженого у цій роботі. Підготувати пропозиції щодо практичного використання результатів роботи.

## Висновки до розділу 1

1. Виконано огляд наукової літератури за темою дослідження, визначені основні проблеми аеродинаміки та теплообміну біля конічної димової труби ТЕС, викладені проблемні питання експлуатації та проектування димових труб.

2. Розглянуто фізичні основи аеродинаміки і теплообміну при зовнішньому обтіканні круглого циліндра постійного діаметра. Вибрано об'єкт дослідження – конічна димова труба на майданчику ТЕС, яка розташована вертикально на поверхні Землі.

3. Показано, що внаслідок впливу інфраструктури навколишнього простору, профіль набігаючого потоку вітру набуває нелінійного характеру з мінімальним значенням швидкості біля поверхні. Характер розподілу швидкості вітру по висоті труби визначається певним типом інфраструктури навколишнього простору.

4. Розглянуто типову інфраструктуру майданчика ТЕС та особливості аеродинаміки та теплообміну під час обтікання димової труби та службових будівель на майданчику ТЕС. Запропоновано геометричну модель майданчика ТЕС для подальших досліджень.

5. Викладено мету та завдання дослідження в області аеродинаміки та локального теплообміну на зовнішній поверхні одиночної конічної димової труби ТЕС у нескінченному просторі, а також з урахуванням інфраструктури навколишнього простору та майданчика ТЕС, напрямку вітру, його швидкості та температури. Обґрунтовано метод дослідження – теоретичний підхід на основі чисельного розв'язання (комп'ютерного моделювання) диференціальних рівнянь гідродинаміки і теплообміну незтиснутого газу (повітря).

## Список використаної літератури до Розділу 1

- [1] Димова труби № 3 Добротвірської ТЕС | КНВП Львівбудакадемія [електронний ресурс]. Доступно: <http://lvivbudakademia.com.ua/inzhenerni-sporudi-2/%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D0%B0-%D1%82%D1%80%D1%83%D0%B1%D0%B8-%E2%84%96-3-%D0%B4%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B2%D1%96%D1%80%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D1%97-%D1%82%D0%B5%D1%81/>
- [2] К. О. Кривденко, «Опалювальна ТЕЦ для міста Ізмаїл», дипломний проект бакалавра, ННІАТЕ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2023. [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/58382/1/Krivdenko\\_bakalavr.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/58382/1/Krivdenko_bakalavr.pdf)
- [3] А. П. Манеев и В. И. Терехов, *Аэродинамика и теплообмен дымовых труб*. М.: АНО Издательский Дом «Научное обозрение», 2017, 226 с.
- [4] W. G. Nusselt, J. Fluid Mechanics. – 1961 - №10. – Р. 345 – 356.
- [5] ДБН В.1.2-2:2006, *Навантаження і впливи. Норми проектування*. [електронний ресурс]. Доступно: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-753>
- [6] Н. М. Фиалко, Р. А. Навродская, С. И. Шевчук, А. И. Степанова, Г. А. Пресич и Г. А. Гнедаш, *Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок*. Київ, Україна: Типографія «Про формат», 2018.
- [7] Bommer, Brennwertechnik mit kondensatwasseraufbereitung (Оптимальний конденсаційний котел BOMAT (ФРГ), Sanitar – Heizungsund Klimatechnik, № 10, 1987.
- [8] О. М. Терех, О. В. Семеняко, О. І. Руденко і В. А. Кондратюк, «Теплообмін поодиноких циліндрів краплеподібної форми в поперечному потоці», *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, т. 1, № 8(67), с. 27-31, 2014. <https://core.ac.uk/reader/288835450>

- [9] О. В. Семеняко, *Методологія обробки результатів досліджень теплофізичних процесів: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт*. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського (Електронне навчальне видання), 2016. [електронний ресурс]. Доступно: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/19822/1/moritfpr-metod-lr.pdf>
- [10] П. І. Багрій, «Теплообмін та аеродинаміка пакетів плоскоовальних труб з неповним оребренням», автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2014, 25 с.
- [11] Е. П. Дыбан и Л. Е. Юшина, «Теплообмен цилиндра конечной длины», *Промышленная теплоэнергетика*, т. 4, № 5, с. 3-8, 1982.
- [12] О. І. Руденко, О. М. Терех, В. О. Туз, В. А. Рогачов і В. А. Кондратюк, «Оцінка теплоаеродинамічної ефективності поодиноких труб різного поперечного перерізу», *Scientific Journal "ScienceRise"*, № 2(7), с. 7-11, 2015. DOI: 10.15587/2313-8416.2015.37446
- [13] E. Achenbach, "The effect of surface roughness on the heat transfer from a circular to the cross flow of air", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 20, P. 359-369, 1977.
- [14] Y. Nakamura and Y. Tomonari, "The effects of surface roughness on the flow past circular cylinders at high Reynolds numbers", *J. Fluid Mech*, Vol. 123, P. 363-378, 1981.
- [15] E. Achenbach, "Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to  $Re = 5 \cdot 10^6$ ", *J. Fluid Mech*, Vol. 34, part 4, P. 625-639, 1968.
- [16] A. Roshko, "Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number", *J. Fluid Mechanics*, Vol. 10, P. 345-356, 1961.
- [17] G. Buresti, "The effect of surface roughness on the flow regime around circular cylinders", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 8, pp. 105-114, 1983.

- [18] E. R. G. Eckert, “Die Berechnung des Wärmeüberganges in der Laminaren Grenzschicht um Stromter Körper,” *VDI-Forschungsheft*, Vol. 416, 1942, pp. 1-24.
- [19] А. Жукаускас, *Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости*. Вильнюс, Литва: Mintis, 1968.
- [20] W. H. Giedt, “Effect of Turbulence Level of Incident Air Stream on Local Heat Transfer and Skin Friction on a Cylinder”, *J. Aeronautical Sciences*, Vol 18, No. 11, Nov 1951.
- [21] Kestin, J., *Advances in Heat Transfer*, 3, Academic Press, New York, 1966.
- [22] P. Grassman, N. Ibl and J. Trub, “Elektrochemische Messung von Stoffübergangszahlen”, *Chemie Ingenieur Technik*, № 8, P. 529-533, 1961.
- [23] E. Achenbach, “Total and local heat transfer from a smooth circular cylinder in cross-flow at high Reynolds number”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 18, P. 105-114, 1975.
- [24] О. Є. Машанова, *Теплові електричні станції: навчально-методичний посібник*. Запоріжжя, Україна: ЗДІА, 2011.  
[https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/399897/mod\\_resource/content/1/TE\\_S.pdf](https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/399897/mod_resource/content/1/TE_S.pdf)
- [25] Э. П. Волков, Е. И. Гаврилов и Ф. П. Дужих, *Газоотводящие трубы ТЭС и АЭС*. М.: Энергоатомиздат, 1987, 280 с.

## РОЗДІЛ 2. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ: ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ СІТКИ ТА МОДЕЛІ ТУРБУЛЕНТНОСТІ

### 2.1. Математичне моделювання

Для обґрунтування сіткової моделі та моделі турбулентності у якості першого наближення до конічної димової труби в цьому розділі розглянуто одиночний нескінченний циліндр, розташований вертикально, для якого теплообмін та гідродинаміка вивчені достатньо добре. Використовується метод обчислювальної гідродинаміки, реалізований за допомогою програмного пакету ANSYS 2020-R1, оснований на числовому моделюванні системи диференціальних рівнянь Нав'є – Стокса, рівняння руху та теплообміну.

#### 2.1.1 Система визначальних рівнянь

Будемо розглядати турбулентний режим руху, для якого запишемо усереднене по числу Рейнольдса рівняння Нав'є – Стокса [1] – [3] для гідродинаміки і теплообміну:

1. Рівняння збереження енергії:

$$\frac{\partial(\rho h_t)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho h_t)}{\partial x_i} = \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \tau_{ij} + \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}), \quad (2.1)$$

2. Рівняння збереження імпульсу:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}, \quad (2.2)$$

3. Рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (2.3)$$

4. Рівняння стану:

$$p = \rho RT, \quad (2.4)$$



При розв'язанні теплової задачі додатково потрібно використовувати рівняння енергії (розподіл температури в потоці) та тепловіддачі.

5. Рівняння енергії:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \nabla T = a \nabla^2 T + C, \quad (2.5)$$

Рівняння тепловіддачі характеризує коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  та записується на основі рівності теплових потоків за рівнянням Фур'є і Ньютона на поверхні теплообміну [3].

В рівняннях (2.1) – (2.5) використовуються наступні позначення:

$h_t = h + \frac{u_i^2}{2}$  – повна ентальпія потоку,

$h = h(T, p)$  – ентальпія потоку,

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,

$\rho$  – густина,

$p$  – статичний тиск,

$u$  – швидкість,

$T$  – температура,

$a$  – коефіцієнт теплопровідності,

$\nabla$  – оператор градієнта,

$\nabla^2$  – оператор Лапласа,

$C$  – джерело тепла (холоду),

$\frac{\partial T}{\partial t}$  – зміна температури за часом,

$\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості.

В рівнянні (2.2):  $\tau_{ij}$  – тензор напружень, що обчислюється за формулою:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad (2.6)$$

де  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

При  $\rho = \text{const}$  рівняння руху матиме наступний вигляд:

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \right), \quad (2.7)$$

В рівнянні (2.7):  $R_{ij}$  – тензор напружень, що обчислюється за наступною формулою:

$$R_{ij} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_t + \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (2.8)$$

При розв’язанні рівнянь турбулентного руху необхідно використовувати модель турбулентності, яка пов’язує середні та пульсуючі характеристики потоку. Виконані дослідження [4] – [8] показують, що при описі теплообміну і гідродинаміки біля круглого нескінченного циліндра широко використовується RNG  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентності [9], яка описується наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( a_k \mu_{ef} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k, \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( a_\varepsilon \mu_{ef} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - \\ - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \end{cases}, \quad (2.9)$$

Тут:  $k$ ,  $\varepsilon$  – кінетична енергія і дисипації турбулентності. В рівнянні (2.9):  $a_k$  та  $a_\varepsilon$  – обернені ефективні числа Прандтля для  $k$  та  $\varepsilon$  відповідно,  $\mu_{ef}$  – ефективна в’язкість.

Ввівши додаткове рівняння для  $\varepsilon$ , далі отримаємо формулу для  $R_\varepsilon$ :

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.10)$$

У формулі (2.10):  $\eta = S k / \varepsilon$ ,  $\eta_0 = 4,38$ ,  $\beta = 0,012$ . Рівняння (2.10) можна записати в наступному вигляді:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( a_\varepsilon \mu_{ef} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.11)$$

$$\text{де } C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3}.$$

### ***2.1.2 Граничні умови***

Одним із етапів для розв'язку наведеної задачі є правильно задані граничні умови. Для аналізу, що має кінцеву кількість елементів, це один із вагомих етапів. Кількість граничних умов повинна бути достатньою для визначення всіх невідомих величин при числовому моделюванні. В пакеті ANSYS 2020-R1 граничні умови вказуються в Workbench у розділі Supports панелі інструментів Environment. В розглянутому випадку для стаціонарних умов потрібно задати геометричні (форма і розмір циліндра), фізичні (теплофізичні властивості потоку) і граничні (на поверхні циліндра і граничних областях) умови однозначності. Зокрема, на межах системи (вдалині від циліндра) задаються швидкість і температура потоку.

Як зазначено в постановці дослідження (розділ 1), аеродинаміка і теплообмін біля одиночної конічної димової труби ТЕС вивчається за наступних умов:

- а) труба ТЕС на поверхні Землі у нескінченному просторі;
- б) труба ТЕС з урахуванням інфраструктури навколишнього середовища;
- в) труба ТЕС з урахуванням навколишнього середовища та інфраструктури майданчика ТЕС.

На всіх етапах подальшого дослідження використовувалися рівняння руху та теплообміну, що було записано вище.

## **2.2 Чисельне моделювання**

### ***2.2.1 Вибір методу розв'язання***

Для розв'язку системи диференціальних рівнянь аеродинаміки та теплообміну біля одиночного вертикального циліндра та димової труби ТЕС використовується метод чисельного моделювання. Суть методу полягає в

дискретизації області, яка досліджується, і заміні системи диференціальних рівнянь системою лінійних алгебраїчних рівнянь відповідно до кількості вузлів розрахункової сітки (декілька сотень тисяч). В наш час розроблені та використовуються багато програмних пакетів, що дозволяють реалізувати чисельні методи розв'язання. Серед таких програм потрібно згадати [10]: SpaceClaim Engineer, Autodesk AutoCAD, SolidWorks, ANSYS та інші. Аналіз публікацій [11] – [17], [36] – [38] показує, що при моделюванні аеродинаміки та теплообміну найбільш широко використовується ліцензійна версія ANSYS 2020-R1.

Серед переваг ANSYS 2020-R1 (порівняно з іншими пакетами) можливо виділити наступні:

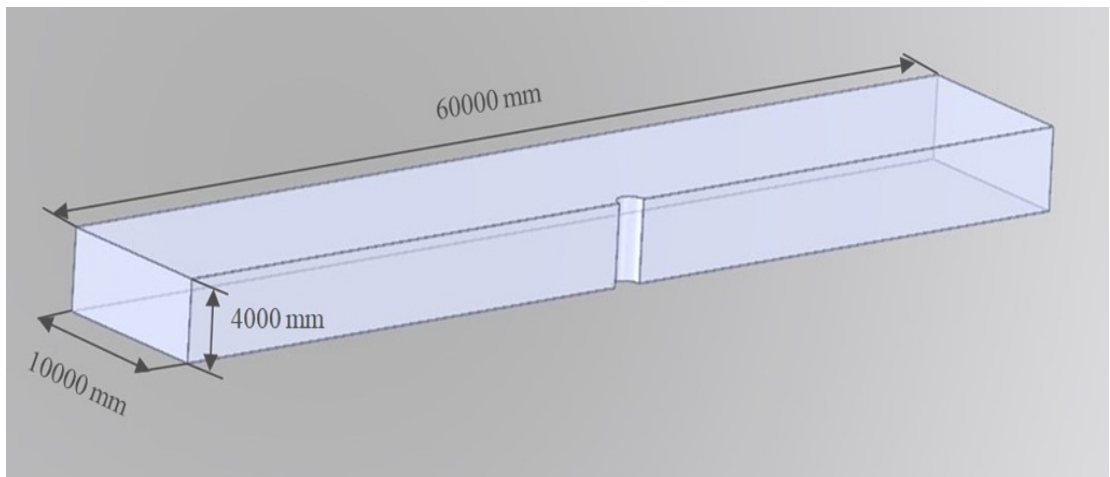
1. Висока точність та деталізація: ANSYS дозволяє моделювати об'єкти складної геометрії, аеродинаміку та теплообмін з високою точністю та деталізацією.
2. Гнучкість моделювання: ANSYS дозволяє налаштовувати різні параметри та властивості моделі, щоб відповідати конкретним умовам дослідницької задачі.
3. ANSYS дозволяє моделювати турбулентні потоки, що може бути важливим для точного відображення аеродинаміки та теплообміну в димовій трубі.
4. Широкий спектр аналізів: стаціонарний та нестаціонарний потік, зміна параметрів у часі, аналіз параметрів матеріалу, аналіз чутливості та оптимізації та багато інших. Це дозволяє проводити різні дослідження та аналізувати вплив різних факторів на аеродинаміку та теплообмін.
5. Моделювання реальних умов: в ANSYS є можливість враховувати різні реальні умови, такі як обтікання реальних об'єктів у середовищі, взаємодію з іншими об'єктами тощо. Це допомагає отримати більш реалістичні результати.

6. Ефективність часу та ресурсів: Використання чисельного моделювання в ANSYS дозволяє виконувати дослідження та аналіз без необхідності виготовлення фізичних прототипів, що заощаджує час та ресурси.

### ***2.2.2 Геометрія розрахункової області***

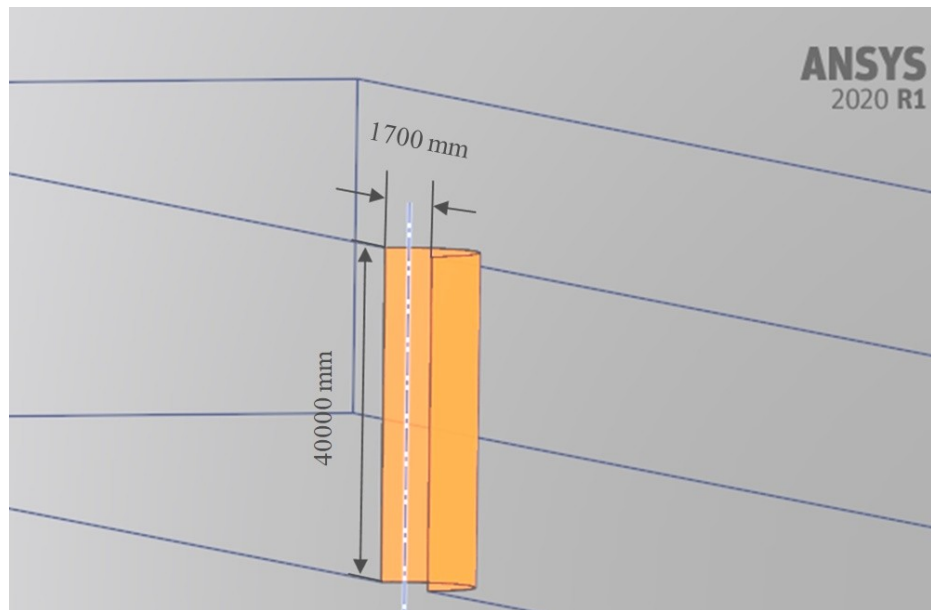
Як вказано вище, на першому етапі в роботі розглядається круглий циліндр при поперечному обтіканні повітрям, аеродинаміка і теплообмін для якого вивчені достатньо детально [18] – [25]. Геометрична модель розрахункової області, в яку було поміщено одиночний конічний циліндр, має форму паралелепіпеда; її було змодельовано в програмному пакеті ANSYS 2020-R1.

На рисунку 2.1 показано вид області розрахунків із зазначенням геометричних параметрів.



**Рисунок 2.1 – Область розрахунків (у перерізі)**

В середині геометричної області було розміщено одиночний вертикальний циліндр, що має геометричні параметри, наведені на рисунку 2.2. Також циліндр було поділено на 40 секцій, висота однієї секції становить 1 м.



**Рисунок 2.2. – 3D-модель одиночного вертикального циліндра  
(переріз у площині ZX)**

### **2.2.3 Розрахункова сітка**

Для точності чисельного моделювання важливе значення має коректно побудована розрахункова сітка на обраній області дослідження. Існує декілька типів сіток: структуровані, неструктуровані, ортогональні, неортогональні, узгоджені та неузгоджені з границею обраної області дослідження. Метод побудови сітки також залежить від поставленої задачі.

В таблиці 2.1 наведено види елементів сітки та їх характеристики.

**Таблиця 2.1**

**Види елементів сіток та їх характеристики**

<b>Двовимірні елементи</b>	<b>Властивості</b>
Трикутник	Відношення сторони і опущеної на неї висоти, нормоване на $\frac{2}{\sqrt{3}}$ . В основі лежить правильний трикутник
Чотирикутник	Детермінант – мінімальне значення визначника матриці Якобі, що

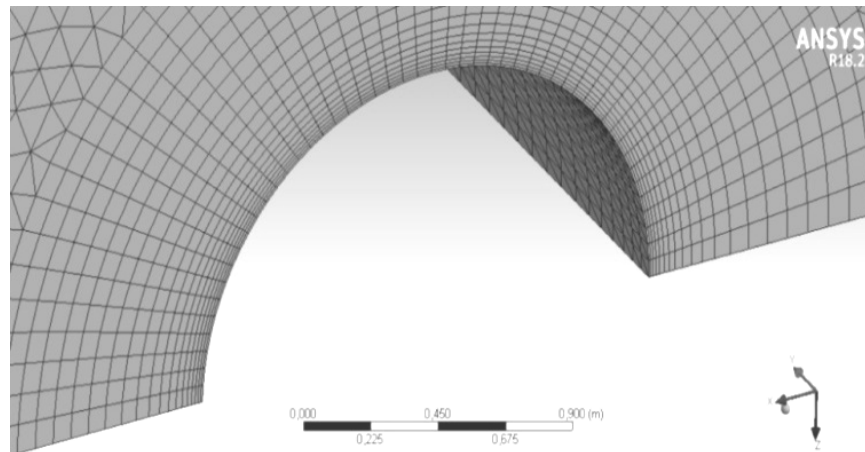
	визначається для кожного з вузлів елемента до максимального значення
<b>Тривимірні елементи</b>	<b>Властивості</b>
Тетраедр	Коефіцієнт форми визначається як відношення вписаного і описаного радіуса сфери, що нормоване на $\frac{1}{3}$ . В основі лежить правильний тетраедр
Гексаедр	Обчислюється детермінант
Піраміда	
Призма	

У програмному пакеті ANSYS 2020-R1 сітка будується в сітковому генераторі ANSYS Meshing [26]. У цьому редакторі відбувається дискретизація розрахункової області (на жаль, опис алгоритмів та їх реалізації відсутній). При побудові сітки на обраній області дослідження задача полягає у знаходженні відображення, при якому вузли сітки фізичної області переходять в обчислювальну.

У поставленій задачі було обрано неструктуровану сітку, елементи якої мали форму тетраедра, та з урахуванням пристінкового шару біля поверхні досліджуваного об'єкта. Обрано метод побудови Tetrahedrons, який є найбільш простим та зручним способом генерації кінцево-елементних сіток. Головною перевагою даного методу є його універсальність, оскільки відсутні обмеження за формою геометричної області, яка розбивається. За метод дискретизації було обрано Patch – Conforming метод. Даний алгоритм генерації сіток побудовано методом Делоне. Він полягає у розбитті обраної області на трикутники таким чином, щоб в описаному трикутнику знаходились тільки точки вершин цього трикутника. Такий метод дозволяє в

достатній мірі дослідити процеси аеродинаміки та теплообміну, які відбуваються в досліджуваній області та біля променевого шару.

Вигляд сіткової моделі продемонстровано на рисунку 2.3.



**Рисунок 2.3 – Сіткова модель. Пристінковий шар.**

#### ***2.2.4 Чисельна модель***

Для проведення досліджень в ANSYS 2020-R1 було розроблено 3D-модель. Така модель створювалася для кожного етапу дослідження (одиначний циліндр, димова труба в міській інфраструктурі, димова труба на майданчику ТЕС), але параметри сітки та метод дискретизації в усіх етапах застосовувалися однакові.

##### ***2.2.4.1 Дискретизація системи визначальних рівнянь***

Наступний крок — це перетворення системи визначальних диференціальних рівнянь у систему лінійних алгебраїчних рівнянь (дискретизація). Для обраної системи (розділ 2.1) обрано метод дискретизації за кінцевими об'ємами (метод контрольного об'єму). Далі розглянемо цей метод детально.



### *Метод контрольного об'єму (МКО)*

Даний метод використовується програмним пакетом ANSYS 2020-R1 та прописаний у коді програми. На жаль, доступу до даних налаштувань у користувачів немає, тому далі буде описано сама суть цього методу. МКО – це обчислювальний метод, в якому використовується просторова дискретизація рівнянь математичної моделі (системи диференціальних рівнянь). У методі контрольних об'ємів визначальна область розбивається на тетраедри – опуклі многокутники, що не перетинаються. Тетраедри повинні повністю перекривати обрану геометричну модель. Контрольний об'єм – це грань тетраедра, яка може межувати тільки з одним сусіднім контрольним об'ємом [27].

У даному випадку диференціальними рівняннями будуть виступати закони збереження. Отримані методом кінцевих об'ємів дискретні рівняння будуть законами збереження енергії, кількості руху, маси для кожного вузла сутки, тобто одержаний розв'язок задовольнятиме закони збереження для всієї області розрахунків [28].

Розглянемо метод контрольних об'ємів на прикладі переносу скалярної величини  $\varphi$ , який розглянуто у роботі [29]. Тоді отримаємо наступне рівняння:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\varphi u) = \nabla \cdot (G \cdot \nabla\varphi) + q, \quad (2.12)$$

В рівнянні (2.12)  $u$  – вектор швидкості в системі координат, що розглядається;  $G$  – коефіцієнт дифузії;  $q$  – джерело.

Проінтегрувавши рівняння (2.12) по об'єму контрольованої комірки з центром в точці  $M$  із застосуванням теореми дивергенції, отримаємо рівняння:

$$\int_{A_M} \frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} dA + \oint_{S_M} \rho\varphi u \cdot n dS = \oint_{S_M} G \nabla\varphi \cdot n dS + \oint_{A_M} q dA, \quad (2.13)$$

Тут  $A_M$  та  $S_M$  – об'єм комірки і гранична поверхня комірки;  $n$  – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні.

Застосувавши теорему про середнє до рівняння (2.13), отримаємо:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi)_M A_M + \sum_f^{N_{fs}} (\rho\varphi u_n)_f S_f = \sum_f^{N_{fs}} G_f \left(\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right)_f S_f + q_M A_M, \quad (2.14)$$

В рівнянні (2.14):  $S_f$  – площа грані;  $N_{fs}$  – кількість граней комірки;  $M$  – індекс значень в центрі комірки;  $f$  – індекс у центрі грані.

Отже, загальний підхід методу контрольних об'ємів – замість середніх по об'єму комірок обирають значення в центрі комірки, середні значення кожної грані замінюють на значення в центрі цієї грані.

Ефективність та якість задачі обчислювальної гідродинаміки значно залежить від способу дискретизації конвективного члена [29].

В загальному випадку різницева схема в напрямку, протилежному потоку, для визначення величини  $f$  контрольного об'єму, що переноситься, матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi_f = R_f \left[ \varphi_M + \frac{1}{2} \lim(\gamma_{f+}) (\varphi_E - \varphi_M) \right] + \\ + (1 - R_f) \left[ \varphi_F + \frac{1}{2} \lim(\gamma_{f-}) (\varphi_M - \varphi_E) \right], \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$R_f = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{|U_n|}{U_n} \right)_f, \quad (2.16)$$

В рівнянні (2.16):

$U_n$  – проекція відносної швидкості на зовнішню нормаль до грані;

$\lim(\gamma_f)$  – обмежувальна функція, необхідна для монотонного розв'язку.  $\lim(\gamma_f)$  визначає властивості і порядок різницевої схеми;

$\gamma$  – відношення похідних  $\varphi$  на прямій, що поєднує центри сусідніх комірок, обчислюється за двома кроками проти потоку.

Характерною особливістю неструктурованих сіток є довільне розташування вузлів у фізичній області. Для таких сіток легко реалізувати локальне згущення і адаптацію в залежності від розв'язання, проте провести дискретизацію конвективного члена в такому випадку складніше. Тобто параметр  $\gamma$  визначається за іншим способом.

Аналізуючи роботи [30], для визначення похідних оберемо точки що знаходяться на деякій прямій  $PF$ . В такому випадку  $P'P = PF = FF'$ .

$$\varphi_{P'} = \varphi_F + (\nabla\varphi)_P \cdot r_{PF'},$$

$$\varphi_{F'} = \varphi_P + (\nabla\varphi)_F \cdot r_{PF'}.$$

Враховуючи, що  $r_{P'F} = -2r_{PF} = -r_{PF'}$ , маємо:

$$\gamma_{f+} = \frac{\varphi_P - \varphi_{P'}}{\varphi_F - \varphi_{F'}} = \frac{2(\nabla\varphi)_P \cdot r_{PF}}{\varphi_F - \varphi_P} - 1, \gamma_{f-} = \frac{\varphi_{F'} - \varphi_F}{\varphi_{P'} - \varphi_P} = \frac{2(\nabla\varphi)_F \cdot r_{PF}}{\varphi_F - \varphi_P} - 1, \quad (2.17)$$

$$(\nabla\varphi)_P = \frac{1}{A_P} \sum_f^{N_{faces,P}} \varphi_f n_f S_f, (\nabla\varphi)_F = \frac{1}{A_F} \sum_f^{N_{faces,F}} \varphi_f n_f S_f, \quad (2.18)$$

$$\gamma_{f-} = \frac{\varphi_{F'} - \varphi_F}{\varphi_{P'} - \varphi_P} = \frac{2(\nabla\varphi)_F \cdot r_{PF}}{\varphi_F - \varphi_P} - 1,$$

Значення  $\varphi_f$  для кожної розглянутої грані визначається як середнє арифметичне значень у центрах суміжних комірок.

$$\varphi_f = \frac{1}{2}(\varphi_P + \varphi_F), \quad (2.19)$$

Для неструктурованої сітки  $\lim(\gamma) = \gamma$ . Тоді отримаємо:

$$\sum_f^{N_{faces}} (\rho\varphi U_n)_f S_f = \sum_f^{N_{faces}} m_f [R_f \varphi_P + (1 - R_f) \varphi_F] + q_{P.conv}, \quad (2.20)$$

$$q_{P.conv} = \sum_f^{N_{faces}} m_f \left[ \frac{1}{2} R_f \varphi_P \lim(\gamma_{f+}) (\varphi_P + \varphi_F) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} (1 - R_f) \lim(\gamma_{f-}) (\varphi_P + \varphi_F) \right]^{\exp}, \quad (2.21)$$

Тут потоки маси через границю визначаються наступним чином:

$$\dot{m}_f = (\rho U_n)_f S_f, \quad (2.22)$$

Тут

$$S_f = \int_0^{2\pi} \left( \int_{r_i}^{r_j} \frac{r_j - r_i}{|r_j - r_i|} r dr \right) d\varphi = \frac{\pi(r_j - r_i)(r_j^2 - r_i^2)}{|r_j - r_i|}, \quad (2.23)$$

#### **2.2.4.2 Методи розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь**

Програмний пакет ANSYS 2020-R1 включає в себе різні модулі для розв'язання різних інженерних задач. Так, у пакеті *Fluent* можна розв'язувати задачі у сфері комп'ютерної гідродинаміки, зокрема аеродинаміку та теплообмін одиночного вертикального циліндра (димової труби ТЕС). Використовуються різні методи для розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь, які описані нижче.

1. Direct Solvers – метод прямих рівнянь. У *Fluent* знаходяться розв'язувачі (наприклад, метод Гауса), які можна обирати при розв'язуванні системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

2. Iterative Solvers – метод ітераційного розв'язування. Більш складні задачі вже потребують для розв'язання використання ітераційних методів. Наприклад, метод збіжних градієнтів.

3. Matrix Factorization – метод факторизації матриць. Серед таких методів може бути метод роздільних коефіцієнтів, метод мінімальних нев'язок.

4. ANSYS *Fluent* за допомогою загальних розв'язувачів також надає користувачам можливість налаштовувати параметри та використовувати різні стратегії для досягнення оптимального результату в конкретних задачах.

### **2.3 Верифікація сіткової моделі: теплообмін**

В обраному варіанті сітки, який описано в пункті 2.2.3, потрібно підібрати необхідні параметри, що покажуть оптимальні результати дослідження. Для того, щоб отримати оптимальний варіант, було проведено дослідження по зміні кількості вузлів сітки та параметрів, що впливають на відстань першого вузла від стінки циліндра  $h$  (мм). Значення параметрів, які змінювалися, та варіанти отриманих сіток показано в таблиці 2.2. Також було

проведено дослідження із збільшення розмірів елементів сітки в залежності від області дослідження.

Таблиця 2.2

## Аналіз чутливості та верифікація

Варіант 1 (GR = 1,025)					
Відстань першого вузла від стінки h (мм)	a	b	c	d	e
	0,02	2,0	4,0	8,0	12,0
Кількість елементів n (вузлів)	1176643 (320841)	1102359 (251844)	1100256 (242114)	1101442 (232904)	1066513 (226887)
5м/с, $\alpha_0 = 21.1 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ за формулою (1.1)					
Y+ max	0,28	29,0	56,0	113,0	172,0
$\alpha, \text{Вт/м}^2\text{К}$	18,6 (-12%)	16,5 (-22%)	17,0 (-19%)	16,3 (-23%)	17,5 (-17%)
15м/с, $\alpha_0 = 43.6 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ за формулою (1.1)					
Y+ max	0,73	75,0	150,	308,0	470,
$\alpha, \text{Вт/м}^2\text{К}$	40,4 (-7%)	38,4 (-12%)	42,0 (-3%)	42,1 (-3%)	42,3 (-3%)
25м/с, $\alpha_0 = 61.1 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ за формулою (1.1)					
Y+ max	1,2	121,0	234,0	492,0	749,0
$\alpha, \text{Вт/м}^2\text{К}$	59,6 (-2%)	62,0 (+1%)	58,5 (-4%)	63,0 (+3%)	65,1 (+7%)
Варіант 2 (GR = 1,1)					
h (мм)	a	b	c	d	e
	0,02	2,0	4,0	8,0	12,0
n (вузли)	317323 (149308)	193611 (81937)	174210 (70933)	155908 (60109)	151484 (59332)
5м/с, $\alpha_0 = 21.1 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ за формулою (1.1)					
Y+ max	0,29	29,0	56,8	113,0	180,0
$\alpha, \text{Вт/м}^2\text{К}$	17,4 (-17,5%)	16,1 (-23,7%)	15,9 (-24,6%)	16,3 (-23%)	14,1 (-33%)
15м/с, $\alpha_0 = 43.6 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ за формулою (1.1)					
Y+ max	0,75	76,0	149,0	304,0	501,0
$\alpha, \text{Вт/м}^2\text{К}$	38,3 (-12%)	39,0 (-11%)	39,9 (-8%)	42,1 (-3%)	34,2 (-21%)
25м/с, $\alpha_0 = 61.1 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ за формулою (1.1)					
Y+ max	1,22	121,0	235,0	490,0	773,0
$\alpha, \text{Вт/м}^2\text{К}$	59,4 (-3%)	63,0 (+3%)	58,6 (-4%)	63,0 (+3%)	51,2 (-16%)

Наведені в таблиці 2.2 варіанти 1 та 2 використовуються для подальшого проведення розрахунків аеродинаміки та теплообміну одиночного вертикального циліндра. Ці варіанти на проміжку  $0.02 - 8$  мм подібні за результатами моделювання. При відстані першого вузла від стінки циліндра та Growth rate (GR) більше 8 мм починає з'являтися нестабільність і відхилення отриманих даних від значень середнього коефіцієнту тепловіддачі за формулою (1.1) більше ніж 20%.

В результаті аналізу вибрано область з параметрами сіткової моделі, що відповідають варіанту  $2d$  таблиці 2.2:  $GR = 1,1$ ;  $h = 8$  мм.

## 2.4 Обґрунтування моделі турбулентності

Для опису турбулентного потоку при дослідженні процесів аеродинаміки і теплообміну з використанням методу комп'ютерного моделювання використовують певні моделі турбулентності, що відповідають конкретній задачі.

Оскільки при математичному описі аеродинамічних та теплових процесів використовуються диференціальні рівняння, усереднені по Рейнольдсу, це призводить до визначення рейнольдсових напруг та запису додаткових диференціальних рівнянь для характеристики турбулентних потоків. Нижче розглянуті основні моделі турбулентності (зв'язок осередненого і пульсуючого руху), які широко використовуються при розрахунках зовнішніх та внутрішніх турбулентних потоків.

### ***k-ε модель [2], [29]***

Двохпараметрична  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентності запропонована в роботах Джонсона і Лаундера (1972 рік), вона забезпечує стійкий розрахунок для

багатьох інженерних додатків. Диференціальні рівняння, що характеризують цю модель, мають вигляд:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k v) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon, \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon v) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \rho, \quad (2.25)$$

де  $v$  – турбулентна енергія,  $\rho$  – густина,  $\mu_t$  – турбулентна в'язкість,  $P_k$  – генерація турбулентних енергій внаслідок нерівномірного поля швидкості,  $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$  – константи,  $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$  – емпіричні константи моделі.

### ***RNG k-ε модель [29]***

Система рівнянь, що описує дану модель турбулентності, описана у розділі 2.1.1. RNG k-ε – модель турбулентності, яка сформульована на основі теорії ренормалізаційних груп. У цій моделі:

- а) вводиться додатковий член у рівнянні для  $\varepsilon$ , утворюючи прогнозування зі швидкими деформаціями,
- б) використовується аналітична формула для турбулентного числа Прандтля, яку дає RNG теорія,
- в) враховуються особливості низьких значень чисел Рейнольдса.

### ***SST k-ω модель Ментера [3], [29]***

У 1993 р. Ментер запропонував RANS модель, яка є однією з найпопулярніших моделей. Її перевага полягає в тому, що вона враховує низькорейнольдсові ефекти в пристінковій ділянці та переваги k-ε моделі далеко від твердої поверхні. Для цього k-ε модель була переформатована в термінах  $k$  і  $\omega$  ( $\omega$  – швидкість дисипації турбулентної енергії), і введена згладжувальна функція, яка забезпечує плавний перехід від k-ω моделі в пристінковій ділянці до k-ε моделі вдалині від твердих стінок [3], [29]. Сьогодні модель Ментера широко використовується у розрахунках

турбулентних потоків. Рівняння перенесення турбулентної енергії та питомої швидкості її дисипації мають такий вигляд:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - Y_k, \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \omega \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + P_\omega - Y_\omega + D_\omega, \quad (2.27)$$

де  $P_\omega$  – член, визначаючий генерацію  $\omega$ ,  $Y_k$  – дисипативне джерело,  $D_\omega$  – дифузний член,  $Y_\omega$  – член, що визначає дисипацію  $\omega$ .

### ***V2F модель*** [31], [32]

Дана модель є однією з останніх модифікацій  $k$ - $\varepsilon$  моделей турбулентності, але враховує пристінкову анізотропію турбулентності та нелінійні ефекти тиску. Ця модель відноситься до моделей з низьким показником Рейнольдса і враховує вплив кривизни ліній струму на структуру турбулентності.

Нижче розпишемо приклад 4-параметричної моделі V2F, яка залежить від  $\varepsilon$ ,  $k$ , масштабу швидкості та еліптичної релаксації функції  $f$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = P - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + S_k, \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{C'_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon}{T} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + S_\varepsilon, \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v^2) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v^2 u_i) = \rho k f - 6 \rho v^2 \frac{\varepsilon}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial v^2}{\partial x_j} \right] + S_{v^2}, \quad (2.30)$$

$$f - L^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_j^2} = (C_1 - 1) \frac{\frac{2}{3} \frac{v^2}{k}}{T} + C_2 \frac{P}{\rho k} + \frac{5v^2/k}{T} + S_f, \quad (2.31)$$

$$T = \min \left[ T', \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \frac{k^{3/2}}{v^2 C_\mu \sqrt{2S^2}} \right], \quad (2.32)$$

$$T' = \max \left[ \frac{k}{\varepsilon}, 6 \sqrt{\frac{v}{\varepsilon}} \right], \quad (2.33)$$

$$L = C_L \max \left[ L', C_\eta \left( \frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \right], L' = \min \left[ \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}, \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{k^{3/2}}{v^2 C_\mu \sqrt{2S^2}} \right], \quad (2.34)$$

де  $C'_{\varepsilon 1} = C_{\varepsilon 1}(1 + 0.45\sqrt{k/v^2})$ ;  $\alpha = 0.6$ ;  $C_1 = 1.4$ ;  $C_2 = 0.3$ ;  $C_{\varepsilon 1} = 1.4$ ;



$$C_{\varepsilon 2} = 1.4; C_{\eta} = 70; C_{\mu} = 0.22; C_L = 0.23; \sigma_k = 1; \sigma_{\varepsilon} = 1.3.$$

Диференціальні моделі турбулентності, розглянуті вище, враховують перенос характеристик турбулентності шляхом розв'язання диференціальних рівнянь переносу. Як величини перенесення турбулентності використовуються параметри до (2.34),  $\varepsilon$ ,  $\omega$ ,  $\nu_t$ . Аналіз виконаних досліджень [2], [33] – [35] і фізичної структури потоку при обтіканні круглого циліндра і конічної труби показав, що в даному випадку найбільш точні результати показують низькорейнольдсові моделі турбулентності, до яких відноситься стандартна  $k$ – $\varepsilon$  та RNG  $k$ – $\varepsilon$  моделі турбулентності.

В RNG  $k$ – $\varepsilon$  використовується додатковий член для  $\varepsilon$ , що дає можливість отримати більш точні результати при розрахунках рідини з високою швидкістю деформації. В моделі враховується вплив вихрів на турбулентний перенос та використовуються аналітичні формули для числа Прандтля та ефективної в'язкості. Ці поправки дають змогу отримати більш точні результати в порівнянні з стандартною  $k$ – $\varepsilon$  моделлю турбулентності.

*Враховуючи ці фактори при розрахунках локального теплообміну та аеродинаміки біля поверхні одиночного вертикального циліндра і конічної труби для розв'язання задачі найбільш придатна RNG  $k$ – $\varepsilon$  моделі турбулентності.*

## Висновки до Розділу 2

1. Розглянуто математичну модель аеродинаміки та теплообміну при зовнішньому обтіканні повітрям одиночного нескінченного вертикального циліндра (диференціальні рівняння руху і теплообміну), сформульовані граничні умови. В якості об'єкта для тестових досліджень використовується круглий циліндр діаметром 1.7 м і довжиною 40 м.

2. Для розв'язку системи диференціальних рівнянь розглянуто числовий метод дискретизації за методом кінцевих об'ємів. Для розглянутих умов числового моделювання запропонована неструктурована

сітка, елементи якої мають форму тетраедра з наступними параметрами якості: *orthogonal quality* більше 0.07, *skewness* менше 0.9, число елементів 193611.

3. Розглянуто особливості дискретизації математичної моделі й основні методи розв'язання системи алгебраїчних рівнянь. Виконано аналіз чутливості сітки при зміні відстані першого вузла від стінки циліндра на інтервалі від 0.02 мм до 12 мм. В якості критерію вибору сітки використовується найменша кількість вузлів при відхиленні до 20% розрахованого коефіцієнта тепловіддачі від середнього значення, розрахованого по літературним даним для «класичного» круглого циліндра при поперечному обтіканні.

4. На основі аналізу опублікованих робіт та існуючих моделей турбулентності по зовнішньому поперечному обтіканню циліндра сформульовано висновок, що найкраще погодження результатів моделювання та експериментальних даних по середньому теплообміну на зовнішній поверхні циліндра при поперечному обтіканню демонструє *RNG k-ε* модель турбулентності.

## Список використаної літератури до Розділу 2

- [1] А. Ж. Мейріс, *«Теплообмін та теплогідравлічна ефективність пучків труб з поверхневими заглибленнями дис. ... канд. тех.. наук: 05.14.06, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2018, 154 с.*
- [2] А. А. Халатов, Є. В. Мочалін, Н. Ф. Димитрієва, *Основи теорії примежового шару*, Київ, Україна, КПІ ім. Ігоря Сікорського (електронне навчальне видання), 2019, [електронний ресурс]. Доступно: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/26035/1/OTPSH\\_NavchPosib\\_Khalatov-Mochalin-Dymytriieva\\_2019.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/26035/1/OTPSH_NavchPosib_Khalatov-Mochalin-Dymytriieva_2019.pdf)
- [3] Диференціальні рівняння руху в'язкої рідини | Підручник для студентів онлайн [електронний ресурс]. Доступно:

[https://stud.com.ua/33920/tovarovnavstvo/diferentsialni\\_rivnyannya\\_ruhu\\_vyazkoyi\\_ridini\\_rivnyannya\\_navye\\_stoksa](https://stud.com.ua/33920/tovarovnavstvo/diferentsialni_rivnyannya_ruhu_vyazkoyi_ridini_rivnyannya_navye_stoksa)

- [4] А. О. Остапенко, Д. О. Ліпунов, «Моделювання багатофазних течій засобами сучасних пакетів прикладних програм», *Наука та виробництво*, № 23, с. 274 – 287, 2020. <http://sap.pstu.edu/article/view/241172>
- [5] Т. Ж. Надригайло, О. С. Тітаренко, «Комп'ютерне моделювання обтікання тіл в'язкою рідиною», *Математичні моделі*, № 2(27), с. 95-100, 2012. <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/74/71/24st95-100.pdf>
- [6] О. В. Жорник, І. Ф. Кравченко, М. М. Мітрахович, О. В. Денисюк, «Обґрунтування моделі турбулентної в'язкості для дослідження характеристик співвісного гвинтовентилятора і вхідного пристрою ГТД», *Авіаційно - космічна техніка і технологія*, № 4(172) с. 35 – 39, 2021.  
doi:10.32620/aktt.2021.4.05
- [7] A. Ullah, A. Amanat, M. Imran, S. Shah, J. Gillani, M. Kilic, A. Khan, “Effect of turbulence modeling on hydrodynamics of a turbulent contact absorber”, *J. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, Vol. 156, P. 1-13, 2020.
- [8] X. Zhang, J. Wu, O. Coutier-Delgosha, H. Xiao, “Recent progress in augmenting turbulence models with physics-informed machine learning,” *J. of Hydrodynamics*, Vol. 31, P.1153–1158, 2019.
- [9] Renormalization group modeling and turbulence simulations / S.A. Orszag, V. Yakhot, W.S. Flannery, F. Boysan, D. Choudhury, J. Maruzewski, B. Patel // International conference on near-wall turbulent flows, Tempe, Arizona, 1993
- [10] Р. Р. Обертюх, А. В. Слабкий, *Теоретичні основи теплотехніки*. ВНТУ (Електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання), 2020. [електронний ресурс]. Доступно: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/586/1066/2148-1?inline=1>
- [11] Д. О. Малахова, «Моделі та методи комп'ютерної підтримки рішень в інформаційних системах підготовки вантажних операцій на танкерах»,

дис....ст. док. філос., Державний університет "Одеська політехніка", Одеса, 2020, 179 с.

- [12] А. П. Чорний, «Вплив стадійної подачі повітря при спалюванні метану на процес утворення оксидів азоту», дипломний проект магістра, ННФТІ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2018.  
<https://core.ac.uk/download/pdf/323535928.pdf>
- [13] В. М. Войцещук, «Дослідження енергоефективного керування вітроустановками малої потужності для генерування електричної і теплової енергії», дипломний проект магістра, ФМСГ, ВНАУ, Вінниця, 2018.  
<http://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/18037.pdf>
- [14] Best Practice: Scale-Resolving Simulations in Ansys CFD [електронний ресурс]. Доступно:  
<https://www.ansys.com/content/dam/product/fluids/cfd/tb-best-practices-scale-resolving-models.pdf>
- [15] What are the advantages and disadvantages of ansys? [електронний ресурс]. Доступно: <https://www.quora.com/What-are-the-advantages-and-disadvantages-of-ansys>
- [16] José Ignacio Rojas Sola, Carlos García-Baena, Hermoso-Orzáez Manuel Jesús, “A Review of the Computational Fluid-Dynamics Simulation Software: Advantages, Disadvantages, and Main Applications”, *Computational Fluid Dynamics (CFD): Characteristics, Applications and Analysis*, Chapter 2, 2016.  
[https://www.researchgate.net/publication/301343046\\_A\\_Review\\_of\\_the\\_Computational\\_Fluid-Dynamics\\_Simulation\\_Software\\_Advantages\\_Disadvantages\\_and\\_Main\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/301343046_A_Review_of_the_Computational_Fluid-Dynamics_Simulation_Software_Advantages_Disadvantages_and_Main_Applications)
- [17] Rahul Krishnan, *Computational Fluid Dynamics (CFD), Finite Element Analysis (FEA) – benefits, steps, scope, examples (Boeing, Saudi Aramco –*

ANSYS FLUENT), 2018/. [електронний ресурс]. Доступно:  
<https://www.linkedin.com/pulse/computational-fluid-dynamics-cfd-finite-element-fea-rahul-krishnan/>

- [18] В. А. Кондратюк, «Теплообмін і аеродинаміка пучків плоскоовальних труб в поперечному потоці», автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.14.06, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2016, 28 с.
- [19] А. А. Халатов, Г. В. Коваленко, М. А. Мулярчук, О. Ю. Степаненко, «Комп'ютерне моделювання поперечного обтікання повітрям циліндра зі спіральною канавкою», *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*, т. 30(69), ч. 2, № 4, с. 27-32, 2019.  
[https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/4\\_2019/part\\_2/7.pdf](https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/4_2019/part_2/7.pdf)
- [20] Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva, Sandro Metrevelle Marcondes Lima e Silva, “Convection heat transfer around a single row of cylinders”, *Computational Thermal Sciences An International Journal*, № 6 (6), 2014.  
doi:10.1615/ComputThermalScien.2014010552
- [21] W. Nowak, A. A. Stachel, “Heat transfer during air flow around a cylinder,” *Strojniški vestnik – J. of Mechanical Engineering*, Vol. 51, P. 379 – 385, 2005.
- [22] E. Salimipour, “A numerical study on the fluid flow and heat transfer from a horizontal circular cylinder under mixed convection,” *Int. J. Heat and Mass transfer*, Vol. 131, P. 365 – 374, 2019.
- [23] R. Hanif, O. G. Bhatti, M. Ebrahim, S. Manzoor, M. Ali, N. A. Sheikh, “Transient fluid flow and heat transfer over a rotating circular cylinder near a wall subject to a single gust impulse”, *Int. J. Heat and Mass transfer*, Vol. 126, p. 2, P. 1178 – 1193, 2018.
- [24] Hao Ma, Zhipeng Duan, “Similarities of Flow and Heat Transfer around a Circular Cylinder”, *J. Symmetry* Vol. 2020, 12(4), 658.  
<https://doi.org/10.3390/sym12040658>
- [25] S. K. Dhiman, Arbind Kumar, J. K. Prasad, “Unsteady computation of flow field and convective heat transfer over tandem cylinders at subcritical

- Reynolds numbers”, *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 31, P. 1241–1257, 2017.
- [26] ANSYS Meshing, Расчетные сетки, [электронный ресурс]. Доступно: <https://www.ansys.soften.com.ua/products/platform/ansys-meshing.html>
- [27] Hrvoje Jasak, “OpenFOAM: Open source CFD in research and industry”, *Int. J. of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 1, Is. 2, Pages 89–94, 2009.
- [28] С. В. Патанкар, *Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости* / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
- [29] Е. В. Мочалин, А. А. Халатов, *Гидродинамика закрученного потока в ротационных фильтрах*, Киев, Украина, 2010.
- [30] К. Н. Волков, «Застосування методу контрольних об’ємів для розв’язування задач механіки рідини і газу на неструктурованих сітках», *Обчислювальні методи і програмування*, т.6, с.43 – 60, 2005.
- [31] Remi Manceau, S. Parneix, D. Laurence, “Turbulent heat transfer predictions using the v2-f model on unstructured meshes”, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol, 21(3), P. 320 – 328, 2020. <https://hal.science/hal-02991043/document>
- [32] v2-f, [электронный ресурс]. Доступно: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-turbulence-ras-v2-f.html>
- [33] Б. Ш. Басок, А. І. Накорчевський, М. П. Новіцька, М. П. Петренко, М. А. Хибина, «Дослідження аеродинамічних процесів в робочому об’ємі гігротермічної печі типу гтп\*135. Частина 1», *Пром. Теплотехніка*, т. 29, №1, с. 60 – 69, 2007. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/61222/10-BasokNEW.pdf?sequence=1>
- [34] В. В. Стоянов, Ш. Жгалли, «Сравнительный анализ моделей турбулентности при моделировании ветровых и снеговых воздействий на здания и сооружения», *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*, т. 29 (68), ч. 2, № 6, с. 199-207, 2018.

<https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/634617>

- [35] В. Ю. Петельчиц, «Cfd-моделирование пленочного охлаждения пластины с входным цилиндрическим участком», *Вісник НТУ «ХПІ»*, № 11(1054), с. 82 – 89, 2014.

<https://core.ac.uk/download/pdf/162888973.pdf>

- [36] В. Г. Солодов, *Применение пакета прикладных программ ansys для решения задач гидрогазодинамики*. Харьков, Украина: Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (Электронное учебное пособие), 2016. [электронный ресурс]. Доступно:

<https://af.khadi.kharkov.ua/fileadmin/F->

[AUTOMOBILE/%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%BE%D1%97\\_%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B8\\_%D1%82%D0%B0%D0%B3%D1%96%D0%B4%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%B8/For\\_students/Solodov\\_MKE\\_2017.PDF](https://af.khadi.kharkov.ua/fileadmin/F-AUTOMOBILE/%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%BE%D1%97_%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B8_%D1%82%D0%B0%D0%B3%D1%96%D0%B4%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%B8/For_students/Solodov_MKE_2017.PDF)

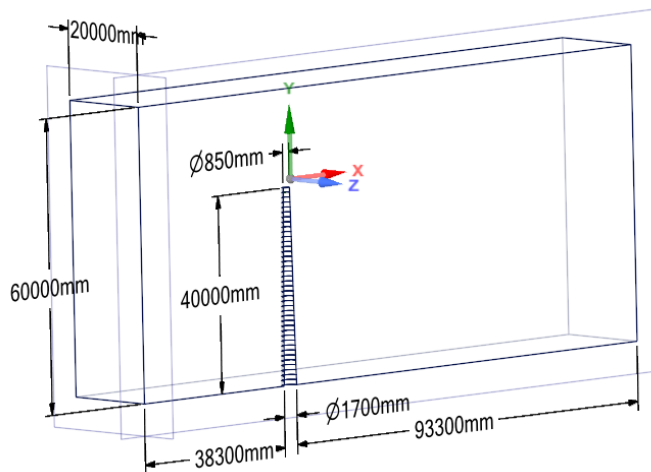
- [37] А. В. Загорулько, *Програмный комплекс ANSYS в инженерных задачах*, Суми, Україна: СумДУ, 2008.

- [38] А. А. Приходько, «Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене», Київ, Україна, Наукова думка, 2003.

### РОЗДІЛ 3. ТЕПЛООБМІН І АЕРОДИНАМІКА БІЛЯ ОДИНОЧНОЇ КОНІЧНОЇ ДИМОВОЇ ТРУБИ: ВПЛИВ ІНФРАСТРУКТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

#### 3.1 Геометрична та комп'ютерна моделі

У цьому розділі розглянуто аеродинаміку та теплообмін біля одиночної конічної труби, розташованої на поверхні Землі. Розміри області дослідження і система координат представлені на рис. 3.1 [1] – [3].



**Рисунок 3.1 – Одиночна конічна труба на поверхні Землі.**

Дослідження виконано у два етапи. На першому етапі розглянуто теплообмін та аеродинаміку біля одиночної конічної труби в нескінченному просторі при рівномірному профілі набігаючого потоку вітру. З іншої сторони на даному етапі в розрахунках враховувалися граничні умови, зумовлені інфраструктурою навколишнього простору, які суттєво впливають на профіль швидкості вітру.

Об'єктом дослідження є конічна труба з такими розмірами, що відповідають державним нормам, розглянутим у розділі 1: діаметр труби в основі – 1.7 м; діаметр в гирлі – 0.85 м, висота – 40 м, розташована на



відстані 38300 мм від входу (рис. 3.1). Комп'ютерну модель розраховано у програмі ANSYS 2020-R1, вона створена в однорідній області (рис. 3.1), де за середовище взято повітря. При розрахунках були використані наступні моделі та алгоритми:

1. Для моделювання пристінного шару використана функція «Enhanced Wall Function». Для з'єднання швидкісного тиску в стійких потоках використаний алгоритм розв'язку «Simplex».

2. При розрахунках не враховувалася залежність густини повітря від температури на вході в розрахунковий об'єм, і також не було враховано сили тяжіння. Температура поверхні труби була задана постійною та дорівнювала 100°C.

3. Відповідно до рекомендацій, приведених в розділі 2, при моделюванні турбулентності застосована *RNG k-ε* модель [3], [4].

Сіткова модель складається з 1 137 781 вузла та 4 741 859 елементів. Мінімальна ортогональна якість сітки становить 0.10, а максимальний перекис – 0.89. Чутливість сітки досліджена в розділі 2.

### 3.2 Програма досліджень

Програма досліджень розглядає різну швидкість та температуру набігаючого потоку вітру (сезонні умови), а також три типи інфраструктури навколишнього простору. При дослідженні застосовувався метод комп'ютерного моделювання (розділ 2), який виконаний у два етапи:

1. Дослідження процесів теплообміну та аеродинаміки поблизу одиночної конічної димової труби ТЕС, розташованої на поверхні Землі, при умові рівномірного профіля швидкості вітру перед трубою (рис. 3.1).

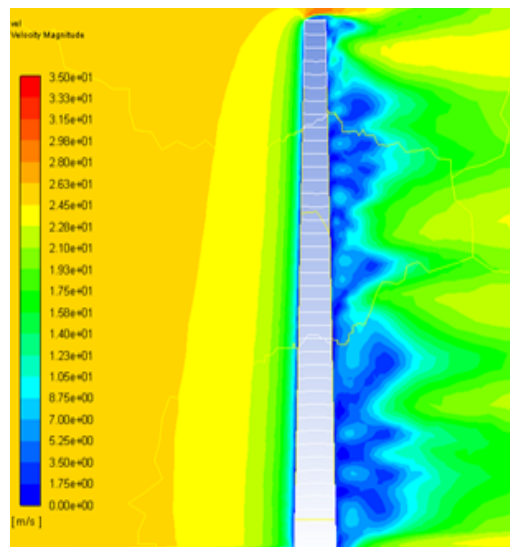
2. Вплив інфраструктури навколишнього середовища (профіля швидкості перед трубою) на аеродинаміку та теплообмін поблизу одиночної конічної димової труби ТЕС.

### 3.3 Теплообмін і аеродинаміка близько конічної труби

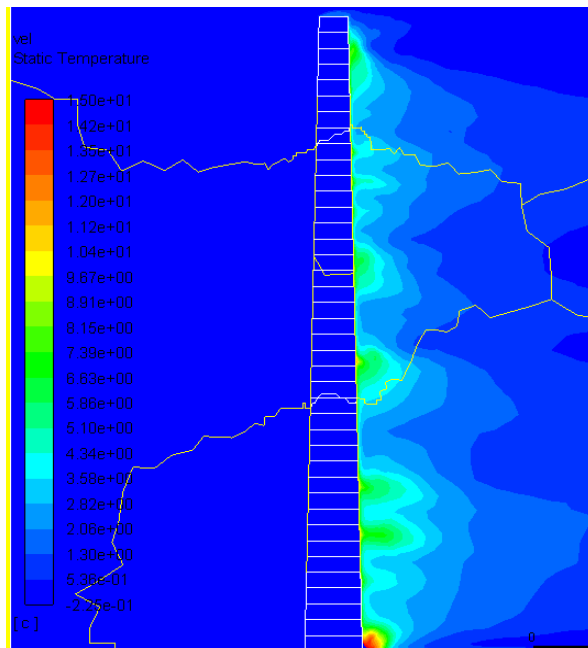
#### 3.3.1 Рівномірний профіль швидкості

Для проведення дослідження конічну димову трубу було поділено на 40 рівних по висоті секцій, кожна секція (позначена як Zone) мала довжину 1 м. Профіль швидкості потоку при розрахунках задано на відстані 38300 мм від основи труби (рис. 3.1) [1].

На рис. 3.2 та 3.3 показано поле швидкості та температури потоку на повздовжньому перерізі труби. Отже, у кормовій зоні труби спостерігається періодичний характер зміни швидкості та температури по висоті труби, що виявлено вперше. Такий характер обтікання обумовлений конічною формою димової труби та впливом земної поверхні (граничної умови).



**Рисунок 3.2 – Поле швидкості при обтіканні одиночної конічної труби. Швидкість набігаючого потоку 25 м/с.**



**Рисунок 3.3 – Поле температури при обтіканні одиночної конічної труби. Швидкість набігаючого потоку 25 м/с.**

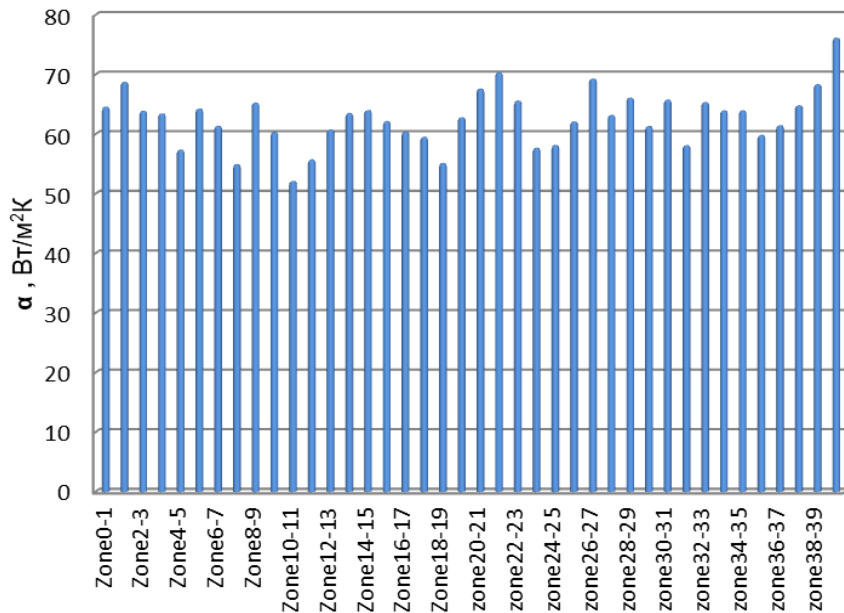
Розглянутий характер обтікання конічної труби призводить до періодичної зміни коефіцієнта тепловіддачі. Нижче у таблиці 3.1 наведено значення коефіцієнта тепловіддачі для кожної із 40 секцій конічної труби. На рисунку 3.4 показано стовпчикову діаграму зміни коефіцієнта тепловіддачі з висотою конічної труби.

**Таблиця 3.1**

**Середній коефіцієнт тепловіддачі по висоті конічної труби (40 секцій). Швидкість потоку 25 м/с**

Секція труби	Середній $\alpha$ (Вт/(м <sup>2</sup> К))	Секція	Середній $\alpha$ Вт/(м <sup>2</sup> К)
Zone 0-1	64.55	Zone 20-21	67.58
Zone 1-2	68.69	Zone 21-22	70.29
Zone 2-3	63.85	Zone 22-23	65.57

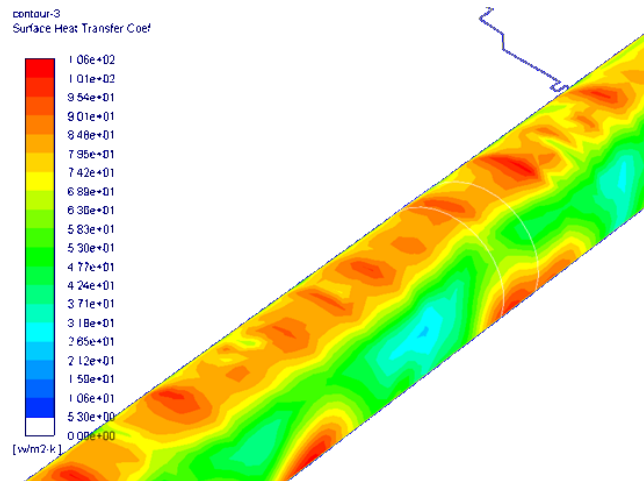
Zone 3-4	<i>63.40</i>	Zone 23-24	<i>57.66</i>
Zone 4-5	<i>57.33</i>	Zone 24-25	<i>58.13</i>
Zone 5-6	<i>64.25</i>	Zone 25-26	<i>62.08</i>
Zone 6-7	<i>61.33</i>	Zone 26-27	<i>69.27</i>
Zone 7-8	<i>54.91</i>	Zone 27-28	<i>63.15</i>
Zone 8-9	<i>65.23</i>	Zone 28-29	<i>66.06</i>
Zone 9-10	<i>60.32</i>	Zone 29-30	<i>61.32</i>
Zone 10-11	<i>52.10</i>	Zone 30-31	<i>65.76</i>
Zone 11-12	<i>55.72</i>	Zone 31-32	<i>58.10</i>
Zone 12-13	<i>60.72</i>	Zone 32-33	<i>65.31</i>
Zone 13-14	<i>63.50</i>	Zone 33-34	<i>63.92</i>
Zone 14-15	<i>63.98</i>	Zone 34-35	<i>63.93</i>
Zone 15-16	<i>62.13</i>	Zone 35-36	<i>59.83</i>
Zone 16-17	<i>60,37</i>	Zone 36-37	<i>61.44</i>
Zone 17-18	<i>59.51</i>	Zone 37-38	<i>64.81</i>
Zone 18-19	<i>55.11</i>	Zone 38-39	<i>68.35</i>
Zone 19-20	<i>62.77</i>	Zone 39-40	<i>76.12</i>



**Рисунок 3.4 – Коефіцієнти тепловіддачі по висоті конічної труби (40 секцій). Zone (1-2) – в основі труби, Zone (39-40) – у гирлі. Швидкість набігаючого потоку 25 м/с**

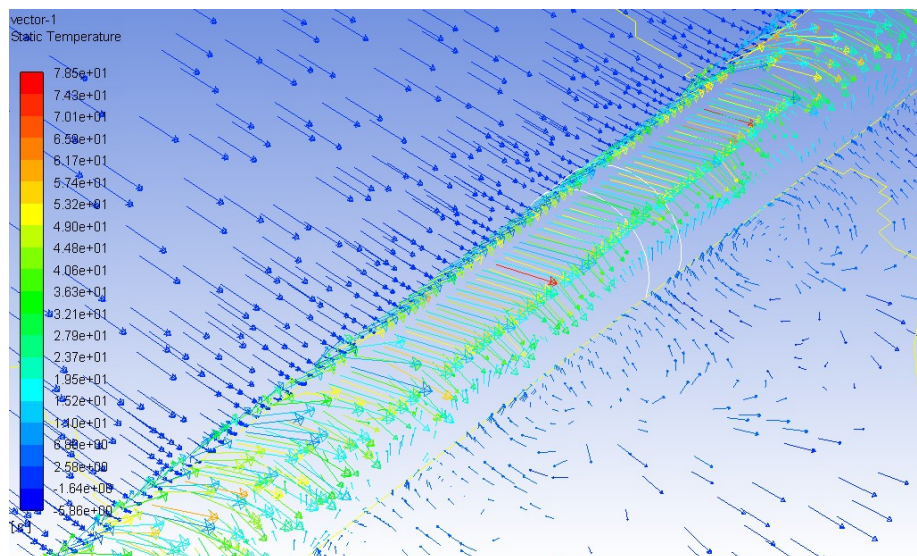
Аналіз даних таблиці 3.1 та рис. 3.4 показує, що максимальне значення коефіцієнта тепловіддачі знаходиться у зоні земної поверхні (Zone 1-2), а також у середній частині труби (Zone 21-22). В області гирла конічної труби (Zone 39-40) збільшення тепловіддачі зумовлене локальними відривними умовами обтікання труби.

Детальна картина розподілу тепловіддачі на поверхні труби для Zone 21-22 показана на рис. 3.5. Отже, в лобовій ділянці труби має місце злиття окремих «плям» тепловіддачі з локальними максимумами. Внаслідок періодичної зміни тепловіддачі у кормовій зоні спостерігаються окремі «плями» високої тепловіддачі.



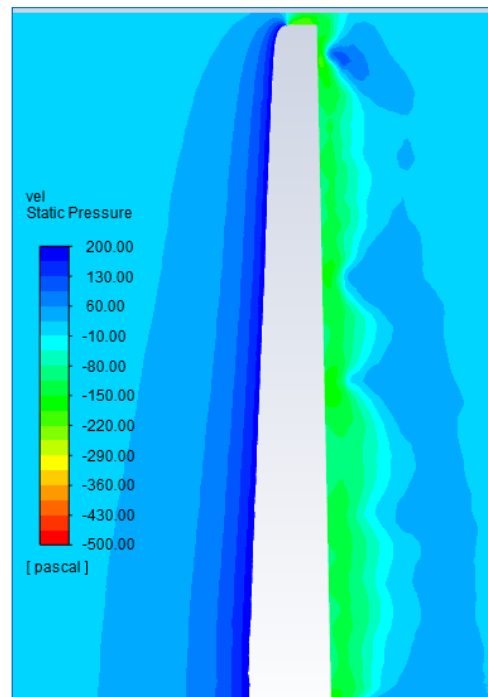
**Рисунок 3.5 – Коефіцієнти тепловіддачі на поверхні конічної труби (Zone 21-22). Швидкість набігаючого потоку 25 м/с**

На рисунку 3.6 наведено вектори швидкості руху повітря яке обтікає поверхню конічної труби [1] – [3]. За конічною трубою виникають зони циркуляції потоку і відриву потоку. Такі зони мають різну інтенсивність, вони можуть бути як застійними за умови, що потік рухається вздовж труби при цьому слабо перемішуючись, так і зворотного характеру – коли на певній зоні труби утворюється зворотній потік з активним перемішуванням.



**Рисунок 3.6. – Вектори швидкості повітря при обтіканні конічної труби (Zone 21-22). Швидкість набігаючого потоку 25 м/с**

Значний вплив на аеродинаміку і теплообмін має розподіл статичного тиску по висоті труби. Розрахунки показали, що в кормовій частині воно має періодичний характер як показано на рисунку 3.7. При цьому у зонах зниженого тиску (наприклад, Zone 21-22), коефіцієнт тепловіддачі має високі показники. Оскільки основа конічної труби лежить на поверхні Землі, то вона впливає на розподіл швидкості по висоті труби та спричиняє нерівномірний розподіл тиску.

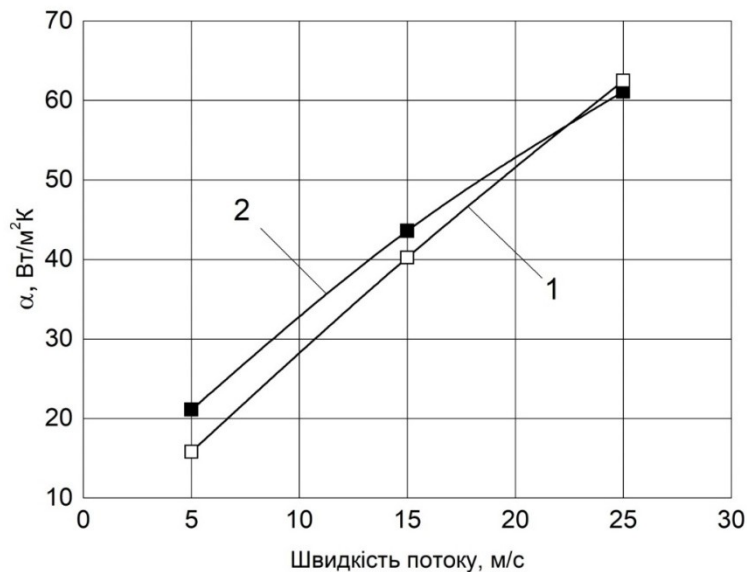


**Рисунок 3.7 – Поле статичного тиску при обтіканні конусної труби.**

**Швидкість набігаючого потоку 25 м/с**

Аналізуючи проведені дослідження, за умови швидкості набігаючого потоку 25 м/с, значення середнього коефіцієнта тепловіддачі за проведеним моделюванням становить 62.5 Вт/(м<sup>2</sup> К), але при розрахунках його за формулою (1.1) це значення становитиме 61.1 Вт/(м<sup>2</sup> К). Порівнюючи ці значення, можна зробити висновок, що при рівномірному профілі швидкості перед трубою конусність труби практично не впливає на середню

тепловіддачу по всій висоті труби. Результати розрахунку, приведені на рис. 3.8, підтверджують зроблений вище висновок для широкого діапазону швидкості набігаючого потоку.



**Рисунок 3.8 – Середній по кутовій координаті і висоті труби коефіцієнт тепловіддачі для конусної труби: Рівномірний профіль швидкості. 1 – розрахунок за формулою (1.1); 2 – результати комп'ютерного моделювання**

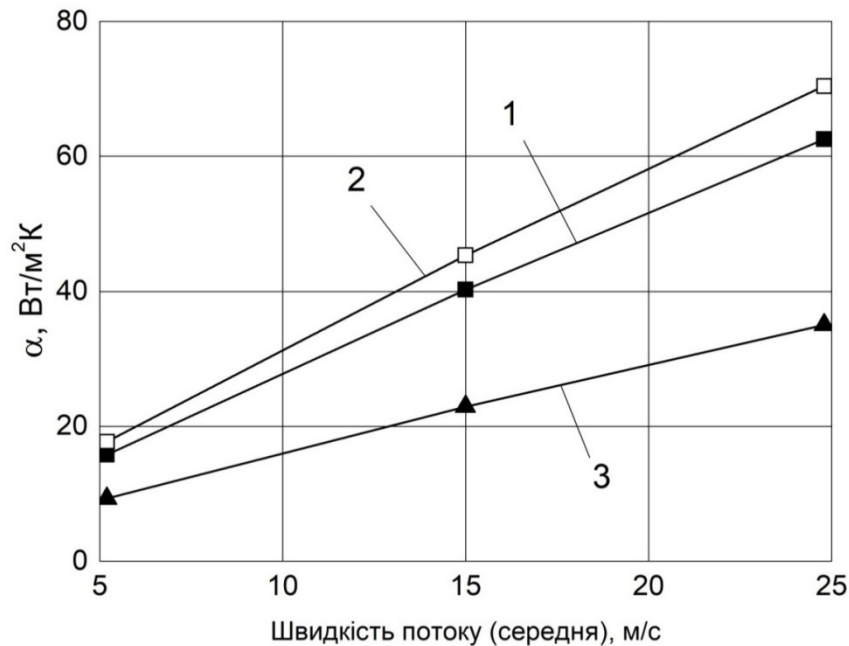
### ***3.3.2 Вплив інфраструктури навколишнього простору***

У реальних умовах, як вказано в розділі 1.3, димова труба розташовується в умовах інфраструктури навколишнього простору різного типу, що істотно впливає на профіль швидкості вітру перед конічною трубою (33800 мм від основи труби). У розділі 1.3 було також показано, що в роботі [5] в цьому випадку профіль швидкості вітру описується рівнянням (1.2).

На рис. 3.9 показано середній по висоті труби коефіцієнт тепловіддачі за умови рівномірного профіля швидкості вітру та для профіля швидкості для типів поверхні А та С (класифікація відповідно до розділу 1.3). З рис. 3.9 можна зробити висновок, що характер профіля швидкості вітру перед трубою (різна інфраструктура навколишнього простору) має значний вплив на



коефіцієнт тепловіддачі [2], [3], [6], [7].



**Рисунок 3.9 – Залежність середнього по висоті конічної труби коефіцієнту тепловіддачі від середньої швидкості набігаючого потоку:  
1 – рівномірний профіль; 2 – тип місцевості А; 3 – тип місцевості С**

Аналіз полів швидкості, статичного тиску та коефіцієнта тепловіддачі в кормовій ділянці труби показав, що і в даному випадку по висоті труби спостерігається періодичний характер зміни цих параметрів (рис. 3.7).

### Висновки до Розділу 3

1. Запропонована геометрична модель одиночної конічної димової труби, розташованої вертикально на поверхні Землі. Висота труби – 40 м, діаметр в основі 1.7 м і в гирлі – 0.85 м. Розроблена комп'ютерна модель, у якій на поверхні труби задавалися граничні умови I роду (температура поверхні), у розрахунках використана *RNG k-ε* модель турбулентності.

2. Вперше показано, що при обтіканні одиночної конічної труби в кормовій області формуються поля швидкості, періодично змінювані по висоті труби, а також поля статичного тиску і коефіцієнта тепловіддачі.

3. При рівномірному профілі швидкості перед трубою конусність труби практично не впливає на середню тепловіддачу труби. Профіль швидкості вітру перед димовою трубою (тип інфраструктури навколишнього простору) має значний вплив на тепловіддачу. Вона може бути як вище, так і нижче середньої тепловіддачі для всієї труби.

### Список використаної літератури до Розділу 3

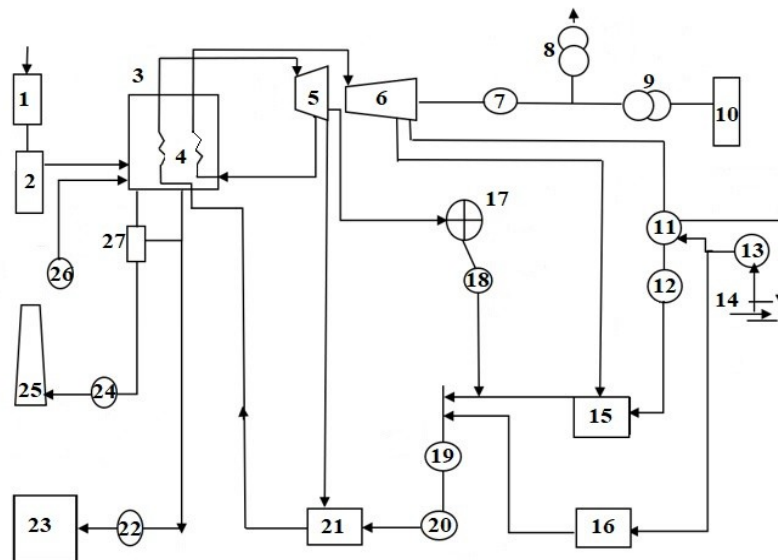
- [1] А. П. Чиркова, А. А. Халатов, В. С. Олійник і О. В. Шіхабутінова «Аеродинаміка та теплообмін одиночної конічної труби при зовнішньому обтіканні», *Теплофізика та теплоенергетика*, т. 43, № 4, с. 25-33, 2021. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.3>
- [2] А. П. Чиркова, А. А. Халатов, Г. В. Коваленко і О. В. Шіхабутінова «Особливості аеродинаміки димових труб сучасних теплових електростанцій», у *XIX Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики»*, Київ, Україна, 13 – 14 травня 2021 р., Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021, с. 122-124.
- [3] А. П. Чиркова, А. А. Халатов, О. В. Шіхабутінова і В. С. Олійник «Аеродинаміка та теплообмін конічної труби ТЕС з урахуванням навколишнього середовища», у *Тезах XII Міжнародній онлайн-конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*, Київ, Україна, 26 – 27 жовтня 2021 р., Київ, Україна: Симоненко О. І., 2021, с. 124-125.
- [4] А. П. Манеев, М. И. Низовцев і В. И. Терехов «Влияние ветра на фильтрацию газов через оболочку дымовых труб», *Теплоэнергетика*, № 4, с. 20-26, 2013. DOI:10.1134/ S0040363613040061

- [5] А. П. Манеев і В. И. Терехов, *Аэродинамика и теплообмен дымовых труб*. М: АНО Издательский Дом «Научное обозрение», 2017, 226 с.
- [6] А. А. Халатов, Г. В. Коваленко, В. С. Олійник та А. П. Ільченко «Особливості димових труб сучасних ТЕС», у *Тезах доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування»*, Харків, Україна, 27 – 28 квітня 2021 р., Харків, Україна: НТУ «ХП», 2021, с. 59-61.
- [7] А. А. Халатов, Г. В. Коваленко, А. П. Ільченко, В. С. Олійник і О. В. Шіхабутінова «Вплив інфраструктури навколишньої поверхні на теплообмін і аеродинаміку конічної димової труби ТЕС», у *Тезах доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування»*, Харків, Україна, 27 – 28 квітня 2021 р., Харків, Україна: НТУ «ХП», 2021, с. 62-63.

## РОЗДІЛ 4. ТЕПЛООБМІН ТА АЕРОДИНАМІКА БІЛЯ ОДИНОЧНОЇ КОНІЧНОЇ ДИМОВОЇ ТРУБИ: ВПЛИВ ІНФРАСТРУКТУРИ ТЕС

### 4.1 Типова інфраструктура ТЕС

Теплова електростанція (ТЕС) – це сукупність енергетичних установок, обладнання та апаратури, що використовуються для перетворення природної енергії на електричну, а також необхідні для цієї споруди та будівлі, розташовані на певній території (майданчик). На рис. 4.1 приведено схему типової інфраструктури теплової електростанції [1].



**Рисунок 4.1 – Типова схема генерального плану інфраструктури ТЕС [1]:**

1 – паливне господарство; 2 – підготування палива; 3 – котел; 4 – проміжний паливоперегрівач; 5 – частина високого тиску парової турбіни; 6 – частина низького тиску парової турбіни; 7 – електричний генератор; 8 – трансформатор для власних потреб; 9 – трансформатор зв'язку; 10 – головний розподільний пристрій; 11 – конденсатор; 12 – конденсаторний насос; 13 – циркуляційний насос; 14 – джерело водопостачання (наприклад, річка); 15 – підігрівач низького тиску; 16 – пристрій підготування води; 17 – споживач теплової енергії; 18 – насос зворотного конденсату; 19 –

деаератор; 20 – насос живлення; 21 – підігрівач високого тиску; 22 – видалення шлаку і золи; 23 – золовідвал; 24 – димосос; 25 – димова труба; 26 – вентилятор; 27 – уловлювач золи [1]

Генеральний план теплової електростанції – це розташування на промисловому майданчику основних та допоміжних споруд [1]. Зазвичай до генерального плану входять: головний корпус з устаткуванням, що знаходиться ззовні (димові труби, димові насоси, золоуловлювачі), електричні щити керування, електричні розподілювачі, системи водопостачання, паливний блок, хімічний цех, адміністративний корпус, майстерні, склади, монтажні майданчики. Загальний вид майданчику Дарницької ТЕС наведений на рис. 4.2, а на рис. 4.3 показано фотографію промислового майданчика Київської ТЕС № 5. Комплекс будівель та споруд промислового майданчика теплової електростанції повинен відповідати не тільки технічній та економічній складовій, а екологічній та естетичній.



**Рисунок 4.2 – Загальний вид майданчику Дарницької ТЕС<sup>2</sup>  
(фото зроблено до 2022 року)**

<sup>2</sup> Фото з <https://ua-energy.org/uk/posts/stolychna-darnytska-tets-pershoiu-v-ukraini-vidmovytsia-vid-zolovidvalu>



**Рисунок 4.3 – Київська ТЕС № 5 (фото зроблено до 2022 року)<sup>3</sup>**

Перед тим як розташувати споруди на промисловому майданчику теплової електростанції, завжди враховується напрямок та сила вітру в певній місцевості, що характеризується «розою вітрів». Роза вітрів – це графічне зображення в метеорології та кліматології, яка характеризує режим вітру в данному місці за багаторічними спостереженнями [2].

У таблиці 4.1 наведено порівняльну характеристику українських та європейських ТЕС щодо відповідності екологічним нормам. Аналіз показує, що українські ТЕС не відповідають екологічним нормам і значно перевищують європейські показники. На теплових електростанціях не встановлюються відповідні фільтри для очищення вмісту сірки та азоту, яка входить до складу шкідливих речовин, при викиді в атмосферу продуктів горіння.

Відповідно до [4], місто Київ виходить у топ найбільш забруднених міст на планеті Земля, на м. Київ припадає 80% від усього забруднення в Україні. До такої невтішної статистики внесли свою складову і ТЕС, що знаходяться у столиці. Проте Україна намагається зменшити викид шкідливих речовин в

<sup>3</sup> Фото з <https://kte.kmda.gov.ua/na-kyivskyh-tets-5-i-tets-6-tryvaye-pidgotovka-do-nastupnogo-opalyvalnogo-sezonu/>

атмосферу. Так, у липні 2022 року було внесено зміни до Закону України «Про охорону атмосферного повітря». Відповідно до нових змін підприємства України, що викидають шкідливі речовини у атмосферу, повинні будуть подавати звіт на створену екологічну платформу Міністерства довкілля, яка має назву «ЕкоСистема». Тобто вся інформація про шкідливі викиди в навколишнє середовище буде знаходитися у відкритому доступі. Цей факт має вплинути на дотримання екологічних норм підприємствами.

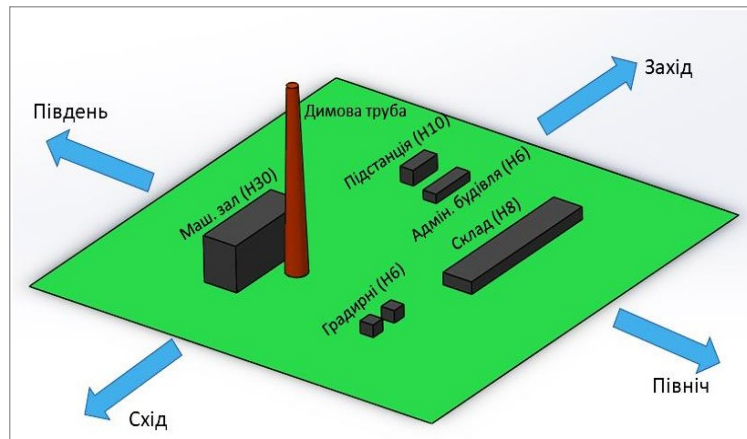
Таблиця 4.1

**Порівняння українських та європейських ТЕС на дотримання екологічних норм [3]**

Стан котла	Нові норми			Існуючі норми		
	Вугілля	Мазут	Природний газ	Вугілля	Мазут	Природний газ
<i>Директива 2001/80/ЕС та Мінприроди № 541</i>						
SO <sub>2</sub>	200	200	35	400	400	35
NO <sub>x</sub>	200	200	100	200	400	200
Пил	30	30	5	50	50	5
<i>Директива 2010/75/EU</i>						
SO <sub>2</sub>	150	150	35	200	200	35
NO <sub>x</sub>	150	100	100	200	150	100
Пил	10	10	5	20	20	5
<i>Нормативи України для потужних ТЕС</i>						
SO <sub>2</sub>	200	200	35	400 - 5100	3100	35
NO <sub>x</sub>	200	200	100	400 - 1800	500	500
Пил	30	30	5	400, 100	100	5

## 4.2 Геометрична та комп'ютерна моделі майданчика ТЕС. Граничні умови.

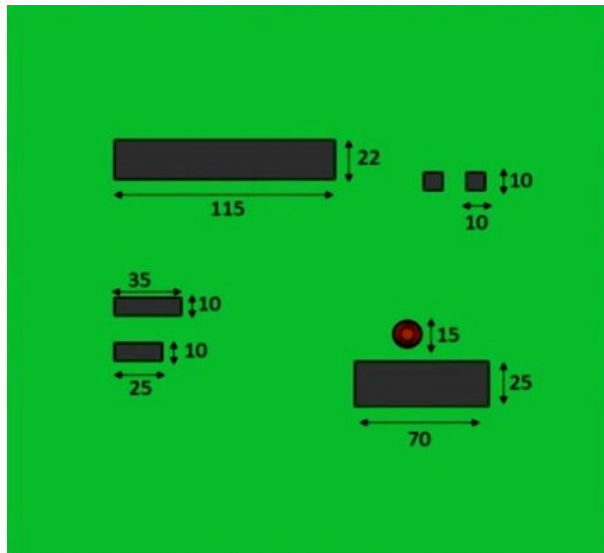
Враховуючі вимоги, наведені в розділі 4.1, для виконання програми дослідження створено спрощену геометричну модель промислового майданчика ТЕС. Враховуючи типову інфраструктуру, в геометричній моделі майданчика теплової електростанції використано наступні головні елементи: машинний зал, підстанція, адміністративна будівля, склад та дві градирні (рис. 4.4, рис. 4.5).



**Рисунок 4.4 – Спрощена геометрична модель інфраструктури теплової електростанції (загальний вигляд), досліджена у цій роботі**

Висота, ширина та довжина елементів, що розміщені на промисловому майданчику ТЕС, вказано на рис. 4.5. Розмір майданчика ТЕС з півдня на північ – 295 м, зі сходу на захід – 247 м. Конічна димова труба має діаметр в основі  $D = 15$  м, діаметр у грилі  $d = 7.5$  м, конусність 0.625, висота труби – 120 м. Відносно будівлі машинного залу димова труба теплової електростанції розташована несиметрично перед будівлею машинного залу. Споруда машинного залу має такі геометричні параметри: ширина –  $70 \times 25$  м; висота – 30 м.

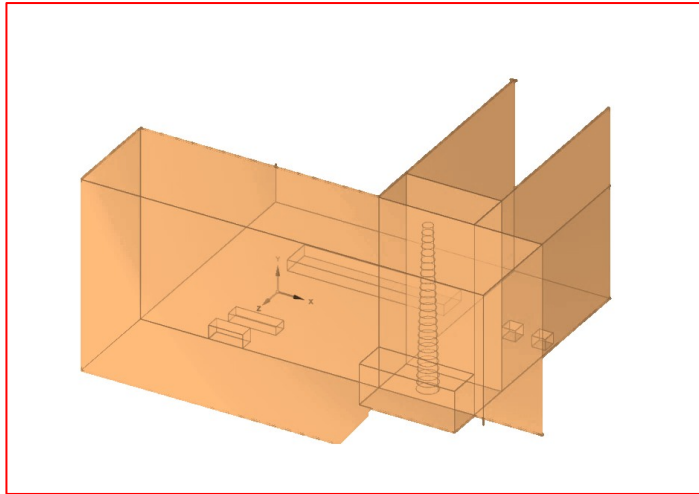




**Рисунок 4.5 – Інфраструктура теплової електростанції (вид зверху).**

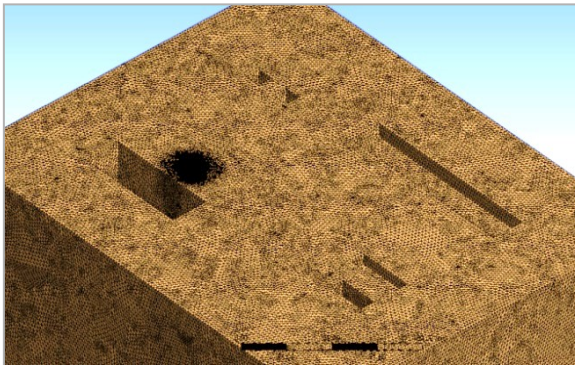
Комп'ютерну модель інфраструктури ТЕС (рис. 4.6) створено у пакеті ANSYS 2020-R1. При розрахунках були використані наступні моделі та алгоритми:

1. Для моделювання пристінного шару використана функція «Enhanced Wall Function».
2. Для з'єднання швидкісного тиску в стійких потоках використаний алгоритм розв'язку «Simplex».
3. При розрахунках не враховувалася залежність густини повітря від температури на вході в розрахунковий об'єм, і також не було враховано сили тяжіння.
4. Температура поверхні труби була задана постійною та дорівнювала 100°C.
5. Відповідно до рекомендацій, наведених у розділі 3, при моделюванні турбулентності застосована *RNG k-ε* модель [5], [6].

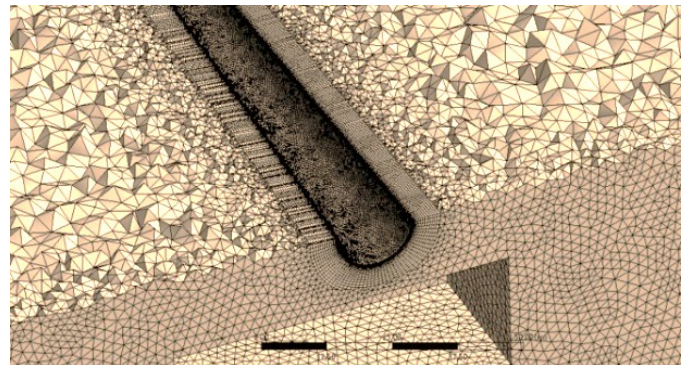


**Рисунок 4.6 – Комп’ютерна модель інфраструктури ТЕС**

Сіткова модель теплової електростанції (ТЕС) зображена на рис. 4.7. Вона складається з 1 137 781 вузла та 4 741 859 елементів. Мінімальна ортогональна якість сітки становить 0.10, а максимальний перекіс – 0.89. Чутливість даної сітки досліджена в розділі 2.



а



б

**Рисунок 4.7 – Сіткова модель інфраструктури ТЕС:**

**а – сіткова модель розрахункового об’єму; б – вид на сіткову модель навколо труби**

В якості граничних умов на границях майданчика ТЕС задано профіль швидкості вітру, що відповідає умовам міської забудови – рівняння (1.1). У

цьому випадку результати розрахунку відповідають спільному впливу інфраструктури навколишнього простору та інфраструктури майданчика ТЕС.

### 4.3 Програма досліджень

На даному етапі виконані розрахунки аеродинаміки та теплообміну навколо димової труби ТЕС з урахуванням інфраструктури промислового майданчика. Як сказано вище, важливий вплив на ці процеси має швидкість та напрямок вітру. Дослідження проводилися з різними напрямками вітру, швидкості потоку та з урахування сезонності, притаманній Україні. Враховуючи результати роботи [6], програма дослідження включає варіанти, які наведено у таблиці 4.2.

**Таблиця 4.2**

#### Початкові дання для розрахунків

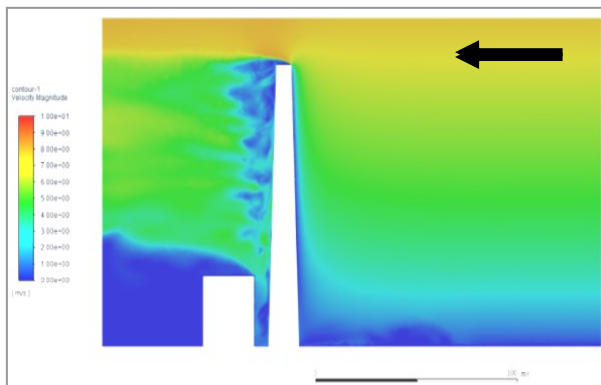
Варіант	Швидкість повітря $w$ , м/с	Температура повітря $t$ , °C	Напрямок повітря	Сезон
Вар. 1	5	–2	Західний	осінь
Вар. 2	15	+35	Західний	літо
Вар. 3	5	+26	Північний	літо
Вар. 4	5	–5	Північний	зима
Вар. 5	5	+10	Східний	весна/осінь
Вар. 6	10	0	Східний	зима/весна
Вар. 7	5	–5	Південний	зима

Далі розглядаються результати дослідження для кожного із варіантів, приведених в таблиці 4.2.

#### 4.4 Результати дослідження та їх аналіз.

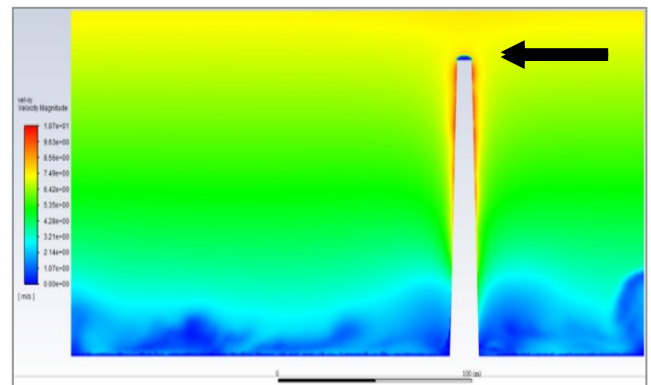
##### 4.4.1 Північний напрямок вітру.

Розглянемо *варіант 4*, який відповідає зимовим умовам. На рис. 4.8 показано розподіл швидкості вітру у перерізах на площинах Z-Y та X-Y. Як і при обтіканні одиночної труби, в кормовій зоні виявлено періодичний характер зміни швидкості, тиску та теплообміну в кормовій ділянці труби (рис. 4.8 а). У цьому випадку періодичність зміни параметрів добре помітна по всій висоті труби, але, головним чином, в області вище будівлі машинного залу.



а) Z-Y переріз.

Напрямок вітру – північний.

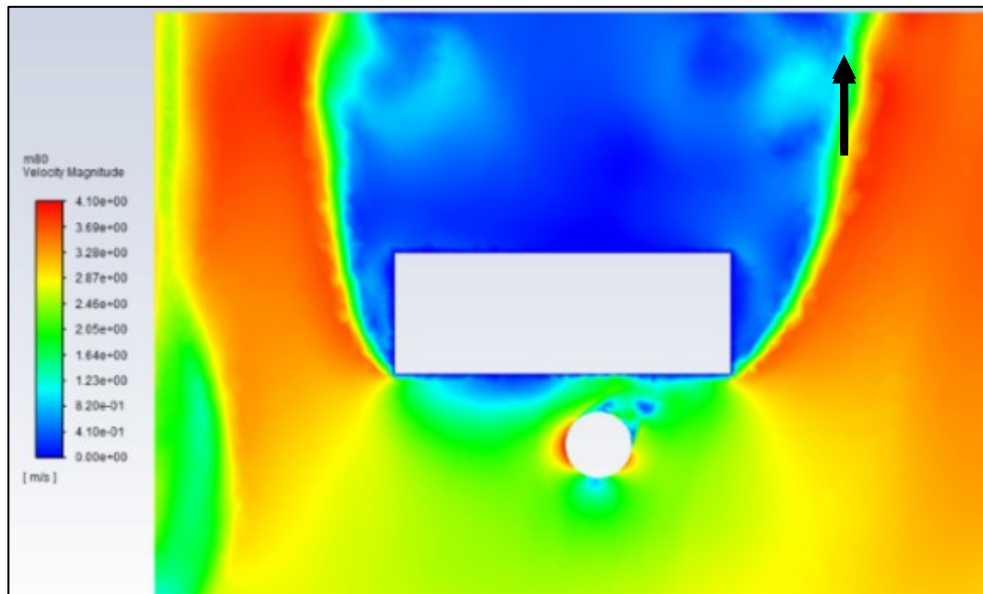


б) X-Y переріз.

**Рисунок 4.8 – Розподіл швидкості вітру в площині Z-Y (а) і X-Y (б) димової труби. Напрямок вітру із півночі на південь**

Як видно з рисунка 4.8 (а), машинний зал є перешкодою для потоку повітря, що обтікає димову трубу. На рис. 4.9 показано обтікання димової труби та машинного залу (вид зверху). З рис. 4.9 можна зробити висновок,

що обтікання будівлі машинного залу не симетричне, що зумовлено розташуванням димової труби ТЕС. Характер обтікання машинного залу має характер тіла, що має несприятливі умови для обтікання, помітні відриви потоку на бічних поверхнях та на даху.

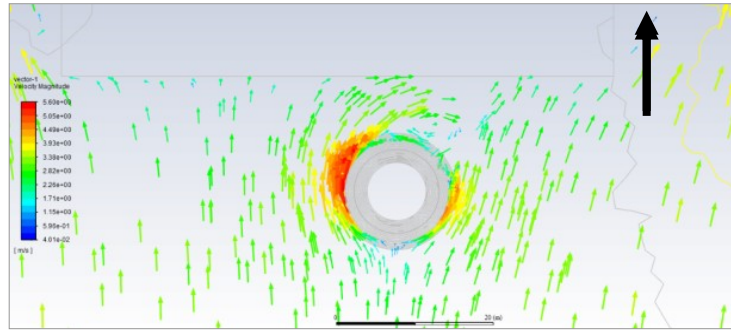


**Рисунок 4.9 – Картина обтікання димової труби та машинного залу.**

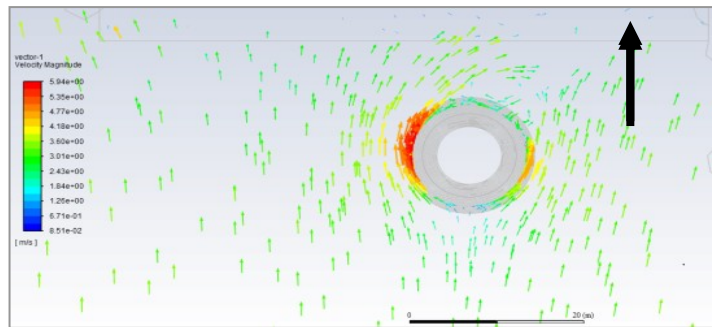
**Напрямок вітру із півночі на південь. Висота перерізу 29 м**

Аналізуючи аеродинаміку димової труби вище будівлі машинного залу, можна помітити періодичну зміну швидкості потоку та статичного тиску по всій висоті труби. Такий характер спостерігався і у випадку одиночної конічної труби, що описано у розділі 3. Така зміна тиску та швидкості має вплив на розподіл тепловіддачі по висоті труби.

Для наочності процесу обтікання димової труби та впливу будівлі машинного залу, а також більш точного проведення розрахунків, в середовищі ANSYS 2020-R1 було зафіксовано векторний напрямок швидкості вітру на різних висотах (20 – 80 м). На рис. 4.10 показано варіанти на висоті 29 м та 31 м. Інші варіанти наведено у додатку А, рисунок А.1.



а



б

**Рисунок 4.10 – Аеродинаміка димової труби при поперечному обтіканні вітром на різній відстані від землі: а – висота 29 м; б – висота 31 м. Напрямок вітру з півночі на південь**

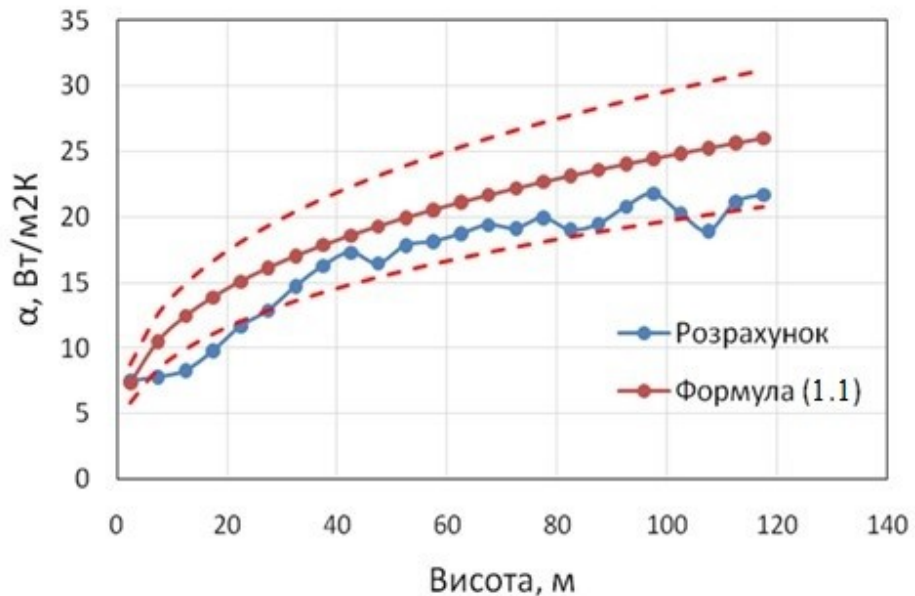
Як видно з рис. 4.10 та рис. А.1 (додаток А), несиметричний характер обтікання димової труби спостерігається до висоти 31 м, так як машинний зал є перешкодою при цьому процесі. За димовою трубою вихор зміщено праворуч, і він має меншу довжину та суцільний характер.

Вище будівлі машинного залу спостерігається розділення вихора на декілька менших вихорів, що мають різний напрямок. Зі зростанням висоти збурення затухають, і процес обтікання поступово стає схожим на обтікання одиночної димової труби, що описано у розділі 3.

На рисунку 4.11 показано зміну коефіцієнта тепловіддачі по кутовій координаті димової труби зі зміною висоти. Можна помітити, що тепловіддача по всій висоті димової труби має менше значення, ніж при розрахунках для одиночної конічної димової труби за умови рівномірного



профіля швидкості набігаючого потоку (розділ 3.3, пункт 3.3.1). У зоні впливу будівлі машзалу помічено відхилення біля 20% від формули (1.1), наведеної у розділі 1. Таке відхилення зумовлено змінним характером обтікання димової труби та зниженням швидкості потоку.



**Рисунок 4.11 – Усереднений по кутовій координаті коефіцієнт тепловіддачі по висоті труби; пунктирна лінія – відхилення  $\pm 20\%$  від формули (1.1). Напрямок вітру із півночі на південь**

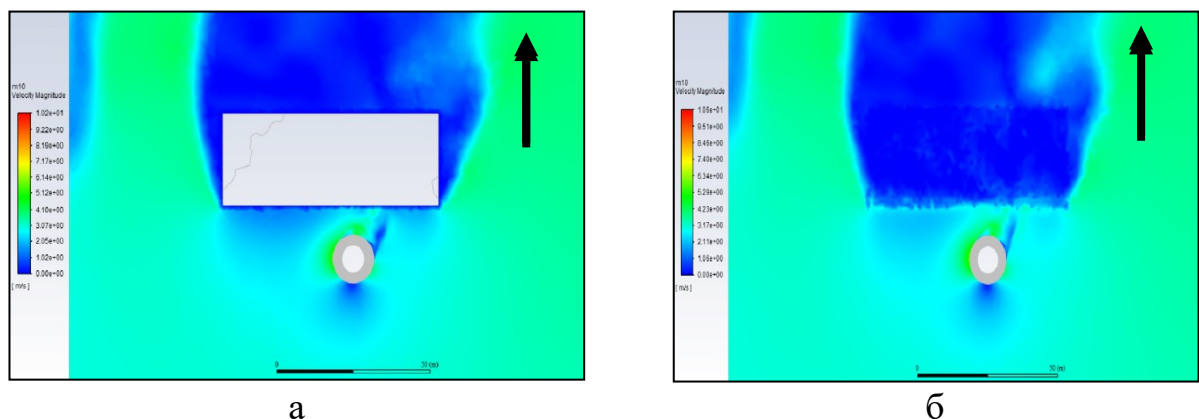
В області вище будівлі машинного залу (висота 30 – 80 м) спостерігається зниження значення тепловіддачі – у порівнянні з формулою (1.1) складає біля 10%. Зі зростанням висоти (80 – 110 м) зменшення значення тепловіддачі знову відхиляється до 20% у порівнянні з формулою (1.1).

Далі розглянемо *варіант 3*, наведений у таблиці 4.1. У цьому варіанті розглядається той же напрямок вітру (північний), що і у варіанті 4. Швидкість повітря 5 м/с, але температура повітря  $+26^{\circ}\text{C}$  (літо).

Для наочності на рис. 4.12 показано поле швидкості в районі впливу будівлі машинного залу (висота 29 – 31 м). Більш детально зміну середньої швидкості по всій висоті димової труби показано в додатку А, рис. А.2.

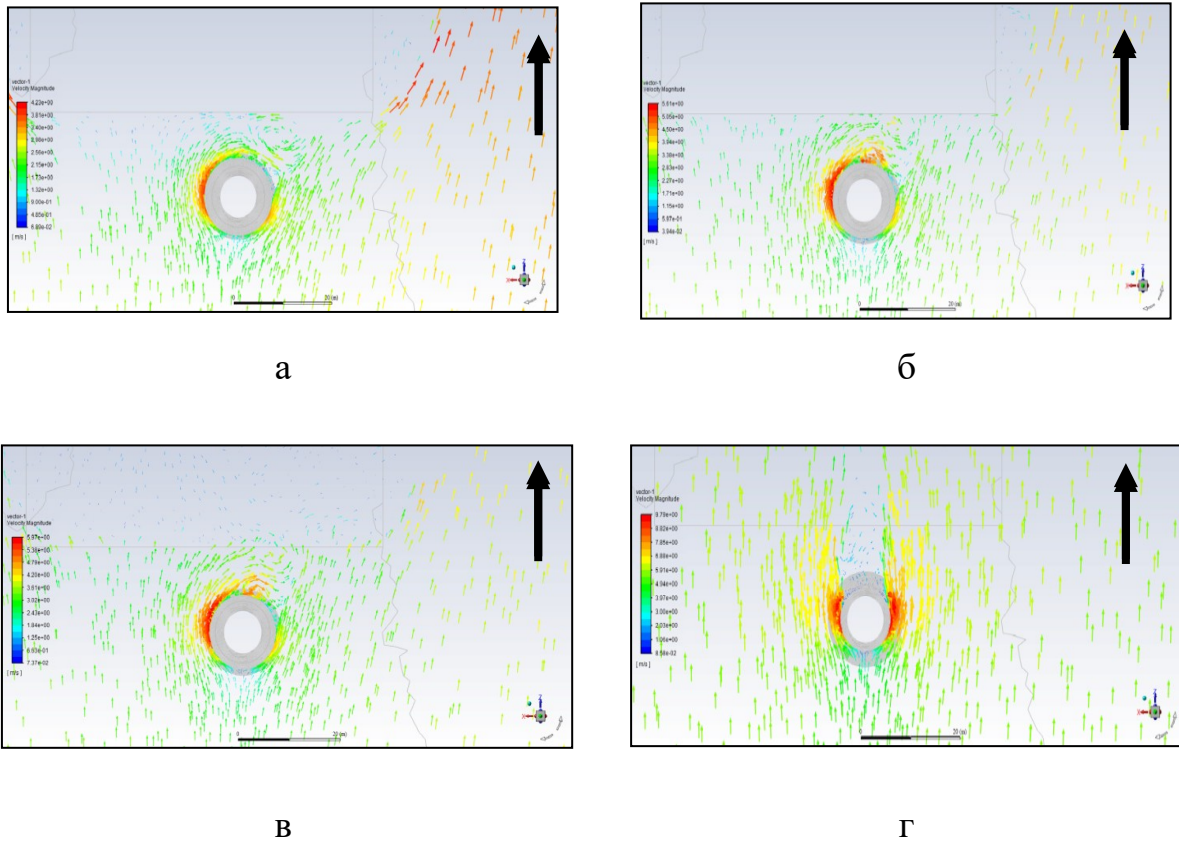
Аеродинаміка системи «машинний зал – димова труба» у випадку варіанту 3 схожа, як і у випадку варіанта 4. Проте є відмінності в самій структурі потоку, що спричинено різною щільністю потоку повітря. У варіанті 3 більш помітне зміщення потоку праворуч при обтіканні машинного залу від фундаменту будівлі до даху. Зсув потоку зберігається навіть вище будівлі машзалу (до 50 м), що видно на рис. А.2 (додаток А). Проте на висоті труби вище 80 м обтікання набуває симетричного характеру. На рис. 4.13 показано аеродинаміку димової труби на різних висотах для варіанта 3.

У варіанті 3 розподіл середнього по висоті трубі коефіцієнта тепловіддачі практично ідентичний до варіанта 4, проте в даному варіанті спостерігаються трохи нижчі значення тепловіддачі. На рисунку 4.14 показано графіки середнього коефіцієнта тепловіддачі, розрахованого за формулою (1.1) та отриманого при розрахунках.



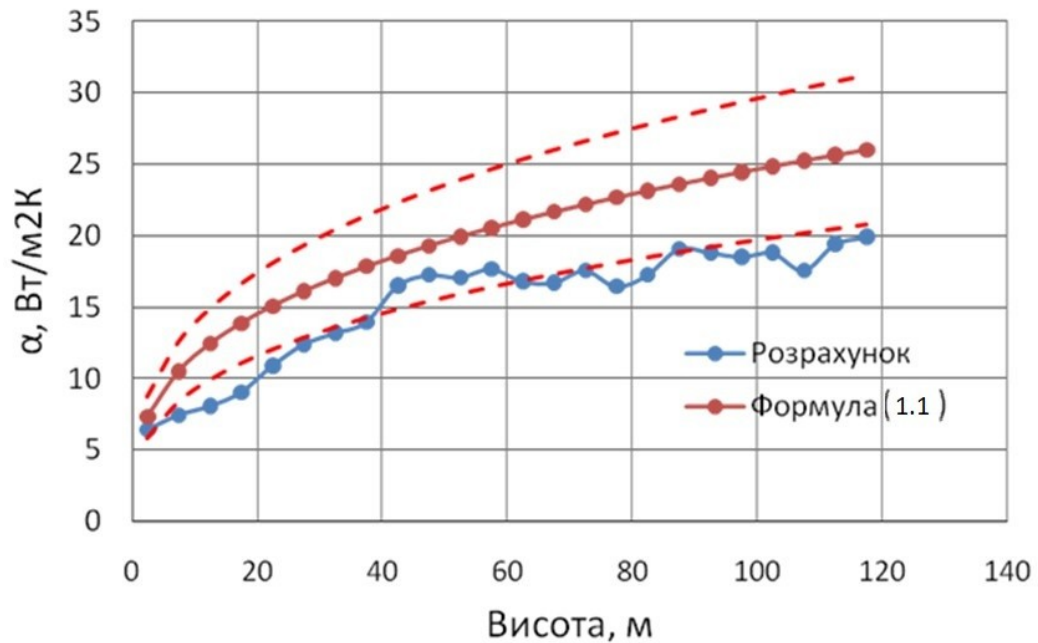
**Рисунок 4.12 – Поле середньої швидкості біля димової труби і машинного залу (вид зверху): а – висота 29 м; б – висота 31 м. Напрямок вітру з півночі на південь**





**Рисунок 4.13 – Аеродинаміка димової труби при поперечному обтіканні (різна висоті від поверхні землі). Варіант 3: а – висота 20 м; б – висота 29 м; в – висота 31 м; г– висота 80 м. Напрямок вітру з півночі на південь**

Отже, у даному варіанті, так як і у варіанті 4, будівля машинного залу, що розташована за димовою трубою, спричиняє зниження тепловіддачі по всій висоті труби, якщо порівнювати її з випадком обтікання одиночної димової труби для рівномірного профіля швидкості перед трубою.

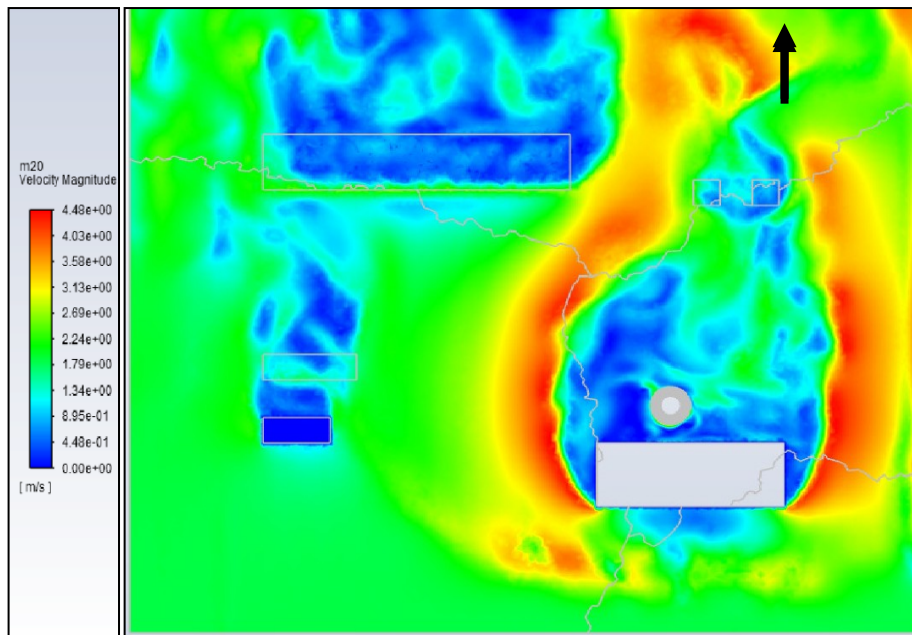


**Рисунок 4.14 – Усереднений по кутовій координаті коефіцієнт тепловіддачі по висоті труби. Варіант 3: пунктирна лінія – відхилення  $\pm 20\%$  від формули (1.1). Напрямок вітру із півночі на південь.**

#### **4.4.2 Південний напрямок вітру**

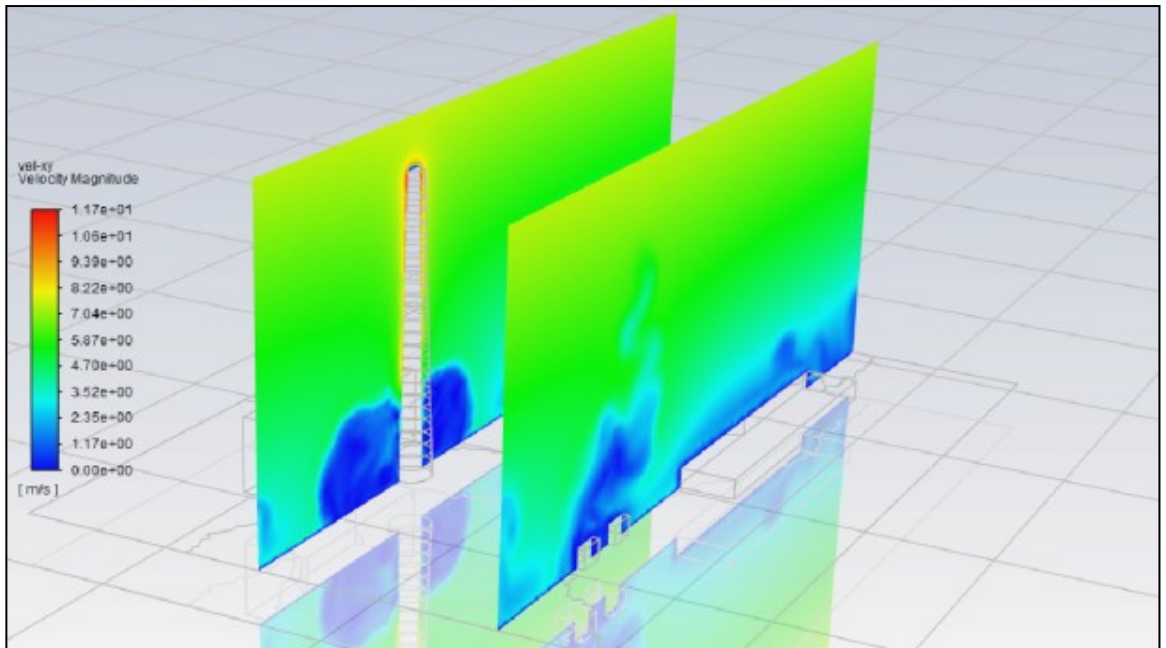
Наступний варіант – це південний напрямок вітру (*варіант 7*, таблиця 4.2): швидкість повітря 5 м/с, температура  $-5^{\circ}\text{C}$  (зима). На рис. 4.15 показано аеродинаміку майданчика теплової електростанції з перерізом на висоті 10 м.

Варіант 7 розглядає протилежний напрямок вітру в порівнянні з варіантами 3 та 4. В цьому випадку будівля машинного залу знаходиться попереду димової труби. Таке розташування машинного залу приводить до частини «затінення» димової труби будівлею до висоти з відривом потоку 30 м. Набігаючий потік огинає будівлю з обох боків та на верхівці зі зниженням швидкості потоку за будівлею приблизно до 0.5 м/с (див. рис. 4.15) [7].



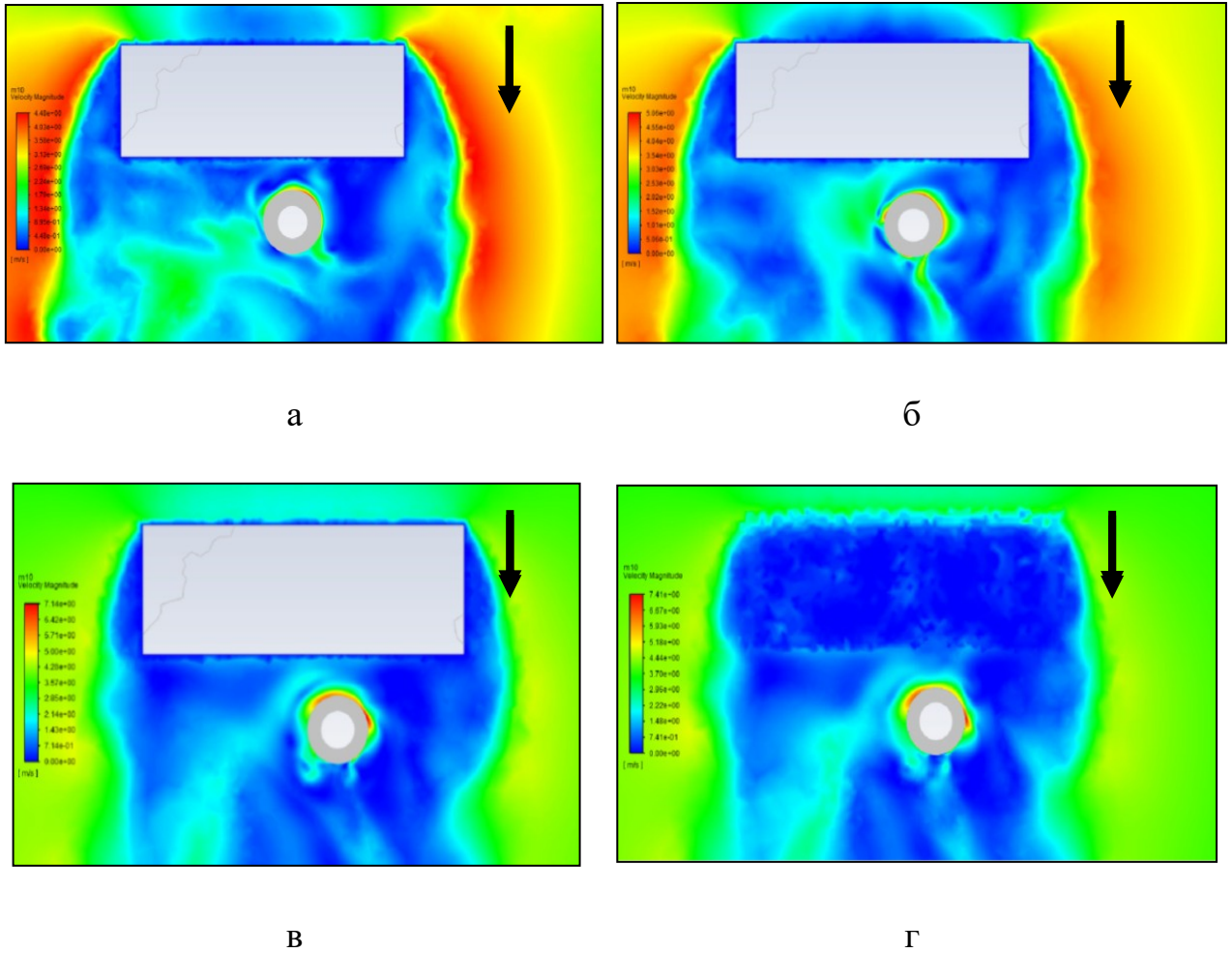
**Рисунок 4.15 – Аеродинаміка майданчика ТЕС. Висота перерізу 10 м.  
Напрямок вітру південний**

Вище будинку машинного залу по всій висоті димової труби спостерігається періодичність коливань швидкості. В свою чергу кормова частина та гирло димової труби обтікаються потоком зі швидкістю, що має значення, близьке до швидкості набігаючого потоку. У поперечному перерізі, що показано на рисунку 4.16, можна виділити дві області зниження швидкості потоку біля димової труби.



**Рисунок 4.16. – Аеродинаміка димової труби ТЕС в поперечному перерізі X–Y. Напрямок вітру південний**

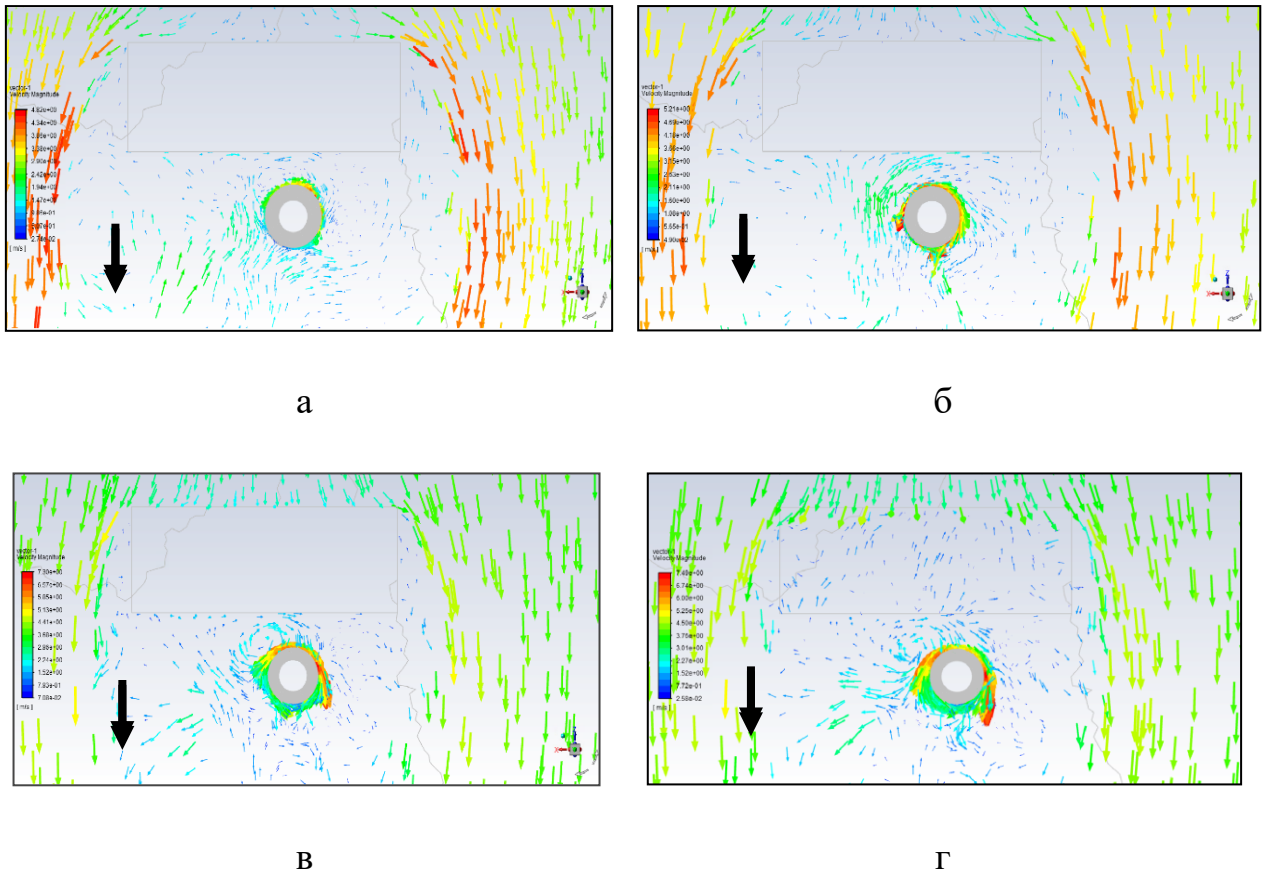
На рисунку 4.17 наведено аеродинаміку обтікання машинного залу та димової труби на різних висотах при перерізі Z–X у зоні дії будівлі машинного залу. Аеродинаміку обтікання на вищих висотах можна побачити на рис. А.3, додаток А. На висоті від 10 м до 31 м, в зоні будівлі машинного залу, димова труба обтікається потоком, що має малу швидкість. На висоті 29 м та 31 м (зона даху будівлі) формується зона підвищеної швидкості. На висоті від 50 м та вище потік поступово приймає симетричну форму обтікання димової труби та має різну довжину «хвоста» за нею.



**Рисунок 4.17 – Аеродинаміка обтікання машинного залу та димової труби на різних висотах (вид зверху): а – висота 10 м; б – висота 20 м; в – висота 29 м; г – висота 31 м. Напрямок вітру південний**

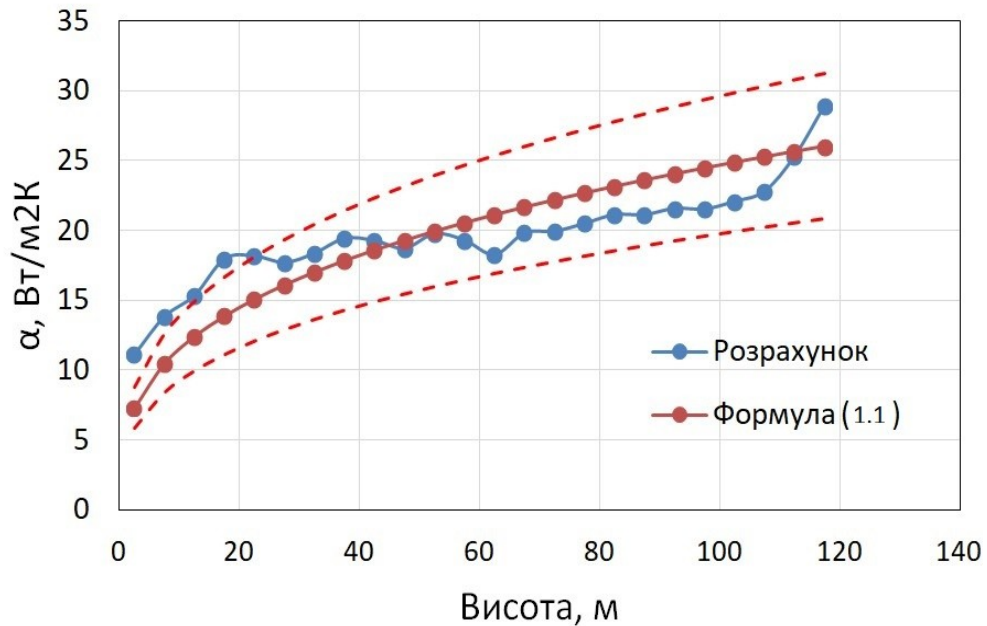
Аналіз результатів показав, що в зоні «затінення» будівлею машинного залу обтікання труби має несиметричний характер з утворенням вихрів та формуванням «сліду» обтікання будівлі машинного залу, що добре помітно на рис. 4.18.





**Рисунок 4.18 – Аеродинаміка поперечного обтікання димової труби на різній висоті від землі): а – висота 10 м; б – висота 20 м; в – висота 29 м; г – висота 31 м. Напрямок вітру південний**

На рис. 4.19 показано усереднений по кутовій координаті і всій висоті труби коефіцієнт тепловіддачі. Аналізуючи отримані дані, можна сказати, що на висоті від основи димової труби до 50 м тепловіддача за розрахунками перевищує значення, що було отримано за рівнянням (1.1) для одиночної труби при рівномірному профілі швидкості набігаючого потоку. Високий коефіцієнт тепловіддачі обумовлений відривним характером обтікання труби. В області висоти труби від 50 м до 110 м, як і при північному напрямку вітру, значення середньої тепловіддачі відрізняється приблизно на 10% за дані розрахунку та зростає в області «гирла» труби.



**Рисунок 4.19 – Усереднений по кутовій координаті коефіцієнт тепловіддачі по висоті димової труби: пунктирна лінія – відхилення  $\pm 20\%$  від формули (1.1). Напрямок вітру південний**

Отже, можна зробити висновок, що положення будівлі машинного залу відносно димової труби суттєво впливає на аеродинаміку труби та призводить до несиметричного характеру обтікання.

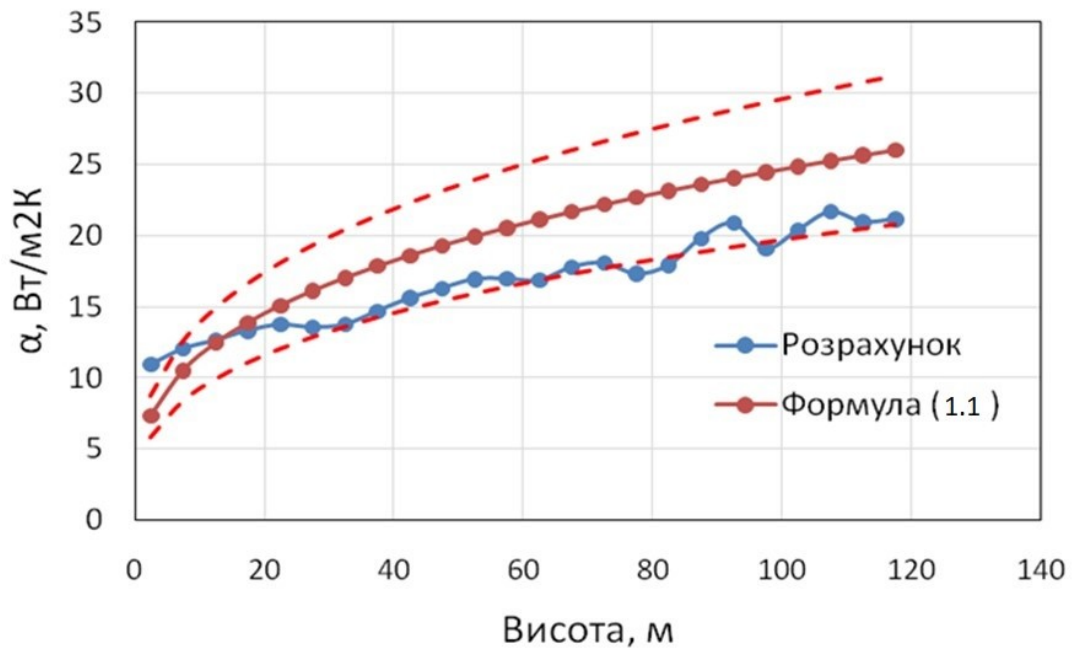
#### **4.4.3 Східний напрямок вітру.**

Далі розглянуто східний напрямок вітру. Цьому напрямку відповідають варіанти 5 і 6, які наведені у таблиці 4.2. У варіанті 5 розглянуто весняно-осінній період: температура повітря  $+10^{\circ}\text{C}$ , швидкість набігаючого потоку повітря - 5 м/с. У цьому варіанті обтікання димової труби та машинного залу відбувається без особливих перешкод. Воно має симетричний характер, причому за будівлею машинного залу з'являється широка відривна зона (рис. 4.20).





області будівлі машинного залу пояснюється мінімальним значенням швидкості біля поверхні землі. Зміна середнього по кутовій координаті коефіцієнта тепловіддачі по висоті димової труби показана на рис. 4.21. Аеродинаміку димової труби при поперечному обтіканні на різних висотах наведено в Додатку А (рис. А.4).

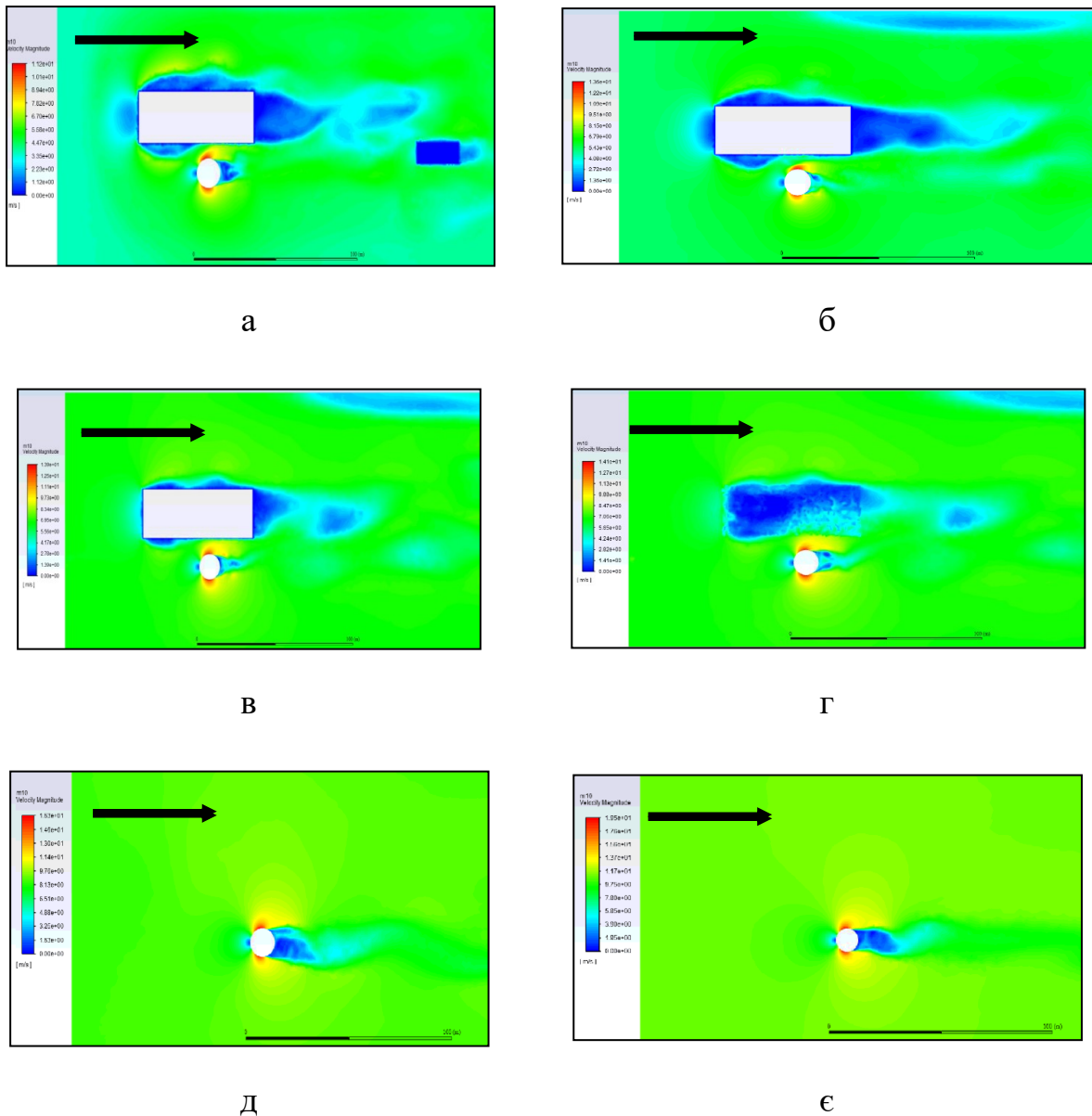


**Рисунок 4.21 – Зміна середнього по кутовій координаті коефіцієнта тепловіддачі по висоті димової труби. Варіант 5. Пунктирні лінії – відхилення  $\pm 20\%$  від формули (1.1). Напрямок вітру східний**

Варіант 6 розглядає той самий напрямок вітру, що і варіант 5, але з більшою швидкістю набігаючого потоку (10 м/с), нижчою температурою повітря ( $0^{\circ}\text{C}$ ) у весняний період. Як і в попередньому варіанті, обтікання димової труби та машинного залу відбувається без перешкод з формуванням широкої відривної зони за будівлею машинного залу.

Проаналізувавши рис. 4.22, можна помітити, що обтікання системи «машинний зал – димова труба», як і у варіанті 5, має практично симетричний характер і з точкою відриву на поверхні труби. Це свідчить про турбулентний характер обтікання димової труби. Тобто можна зробити

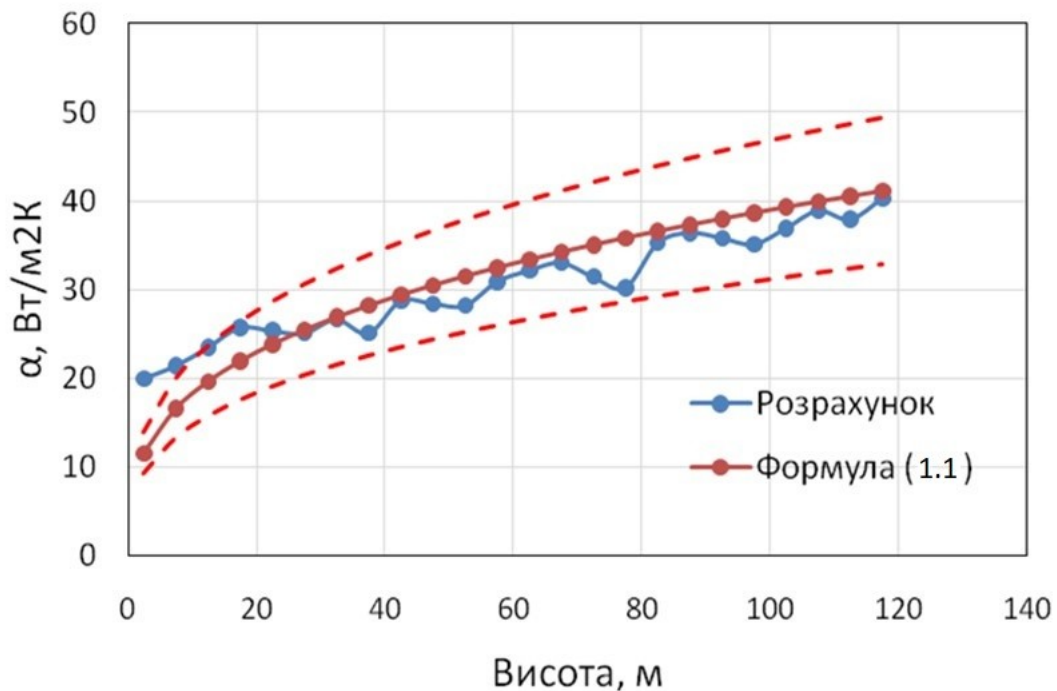
висновок, що в даному випадку будівля машинного залу майже не впливає на характер поздовжнього обтікання труби.



**Рисунок 4.22 – Аеродинаміка димової труби на майданчику ТЕС при поперечному обтіканні (різна висоті від землі). Варіант 6: а – висота 10 м; б – висота 20 м; в – висота 29 м; г – висота 31 м; д – висота 50 м; е – висота 80 м. Напрям вітру східний**

Розподіл середньої тепловіддачі по висоті димової труби є подібним варіанту 5, але, оскільки швидкість вітру вище, то значення загальної тепловіддачі також вище, ніж у варіанті 5. Графік зміни середнього по

кутовій координаті коефіцієнта тепловіддачі по висоті димової труби показаний на рис. 4.23.



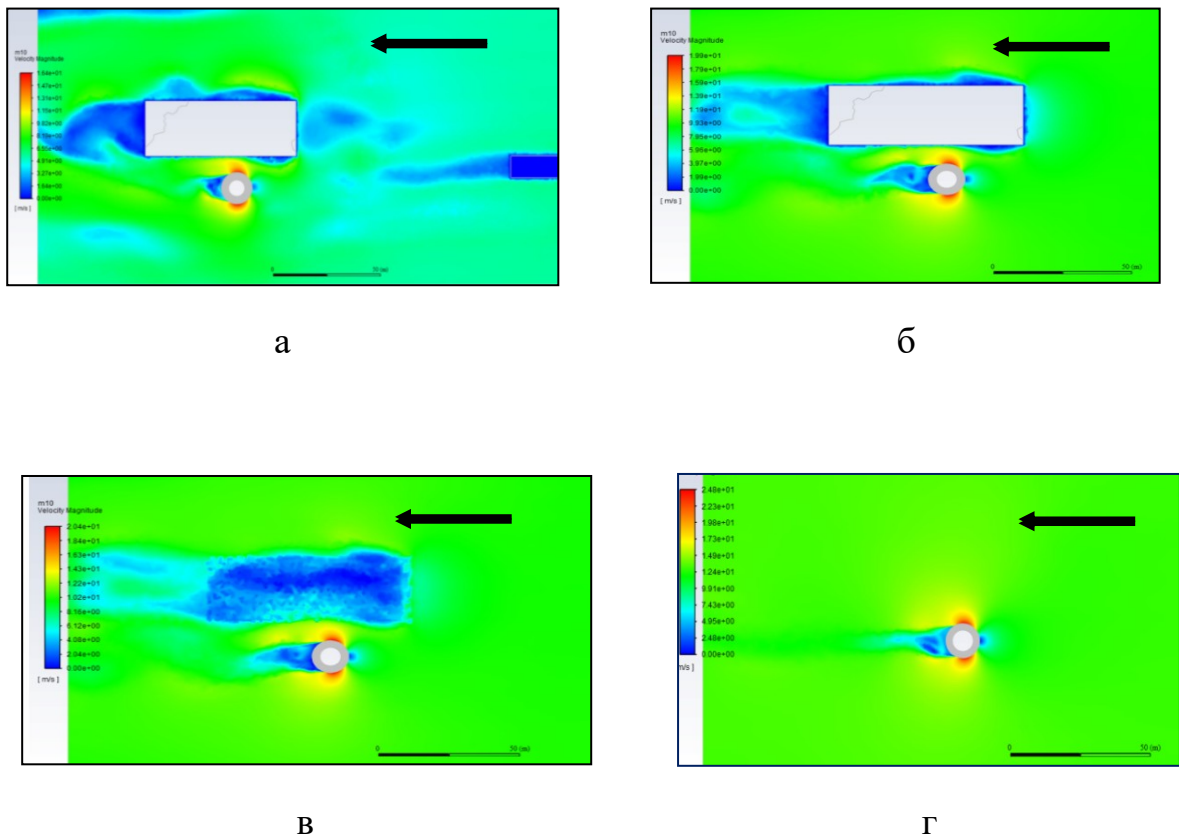
**Рисунок 4.23 – Усереднений по кутовій координаті коефіцієнт тепловіддачі по висоті димової труби. Варіант 6. Пунктирна лінія – відхилення  $\pm 20\%$  від формули (1.1). Напрямок вітру східний.**

Як і у варіанті 5, на висоті до 31 м (межі будівлі машинного залу) тепловіддача зростає, а на висоті вище 31 м зменшується. На висоті від 31 м до 120 м середній коефіцієнт тепловіддачі нижчий за дані, отримані за формулою (3.1). Отже, змінний характер тепловіддачі в області будівлі машинного залу пояснюється профілем швидкості з мінімальним значенням біля поверхні землі та розрахованим за формулою (3.2).

#### **4.4.4 Західний напрямок вітру.**

Дослідженню західного напрямку вітру відповідають варіанти 1 і 2 таблиці 4.2. У варіанті 1 задані наступні початкові параметри: швидкість повітря 5 м/с, температура повітря  $(-2)^{\circ}\text{C}$ , сезон – осінь. За таких умов

повітряний потік обтікає машинний зал, який знаходиться поряд з димовою трубою, після подолання інфраструктури ТЕС. Отже, набігаючий потік вже має деформовану структуру у порівнянні з вихідним профілем швидкості, що розраховувався за рівнянням (1.1). На рис. 4.24 показано поле швидкості біля димової труби та машинного залу.

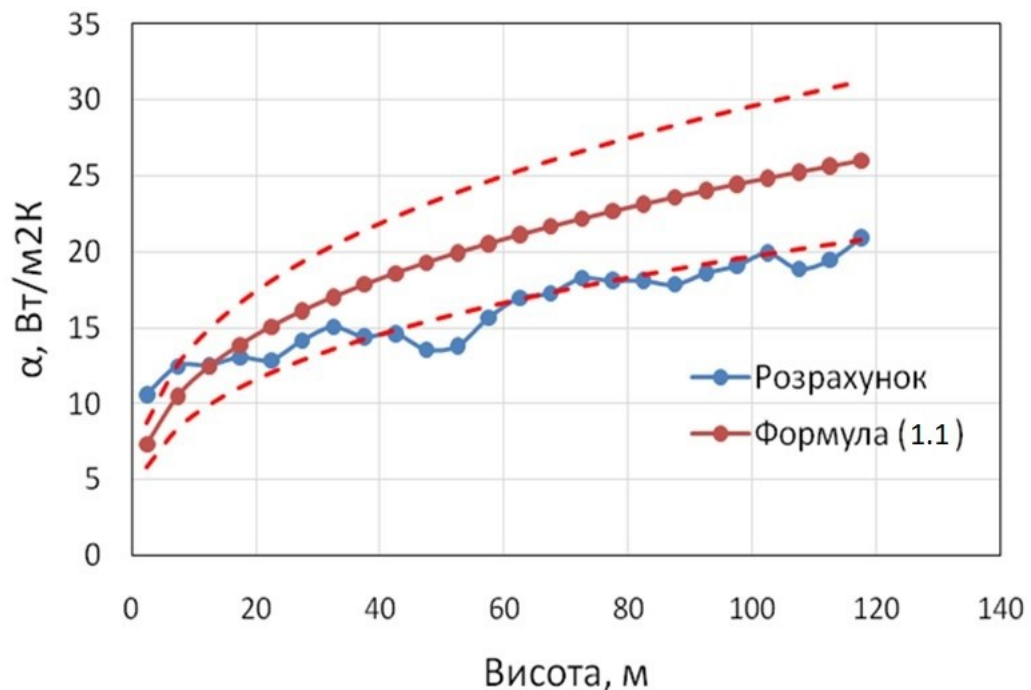


**Рисунок 4.24 – Поле середньої швидкості біля димової труби і машинного залу при русі потоку з права наліво (поперечний розріз на різній висоті). Варіант 1: а – висота 10 м; б – висота 29 м; в – висота 31 м; г – висота 50 м. Напрямок вітру західний**

З рис. 4.24 видно, що на висоті 10 м машинний зал обтікається несиметрично. Зі збільшенням висоти на рівні 20–29 м несиметричність зменшується, але димова труба має симетричний характер обтікання по всій висоті. Звідси можна зробити висновок, що в цьому випадку машинний зал

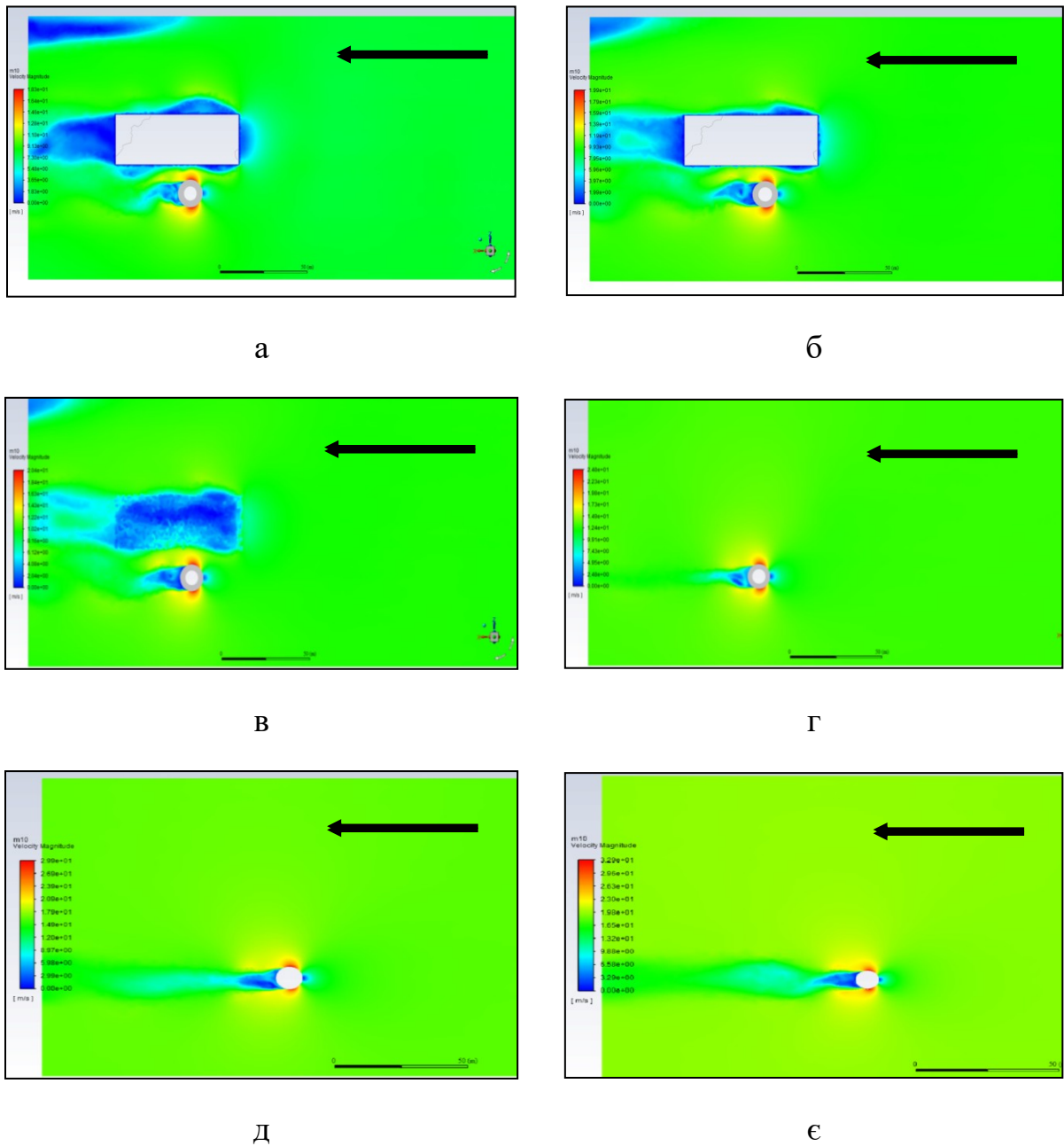
не має істотного впливу на аеродинаміку димової труби. Проте за димовою трубою до висоти 50 м потік має структуру, відмінну від класичного випадку обтікання круглого циліндра в нескінченному просторі. Зі збільшенням висоти обтікання димової труби обтікання набуває симетричного характеру.

З графіка (рис. 4.25) видно, що до висоти 12 м значення середньої тепловіддачі вище, ніж одержане за формулою (1.1). Зі збільшенням висоти змодельовані значення середньої тепловіддачі приблизно на 20% нижче значень, розрахованих за формулою (1.1).



**Рисунок 4.25 – Зміна середнього по кутовій координаті коефіцієнта тепловіддачі по висоті димової труби. Варіант 1: пунктирна лінія - відхилення  $\pm 20\%$  від формули (1.1). Напрямок вітру західний**

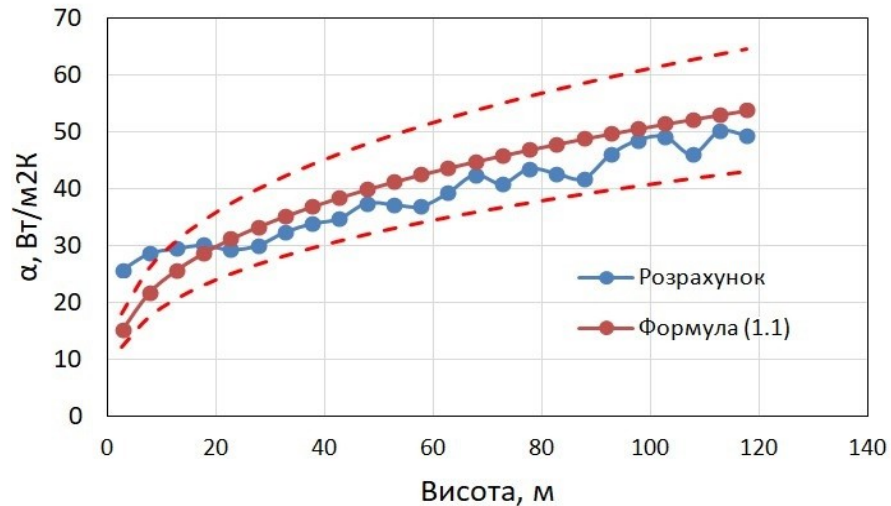
У варіанті 2 також розглядається західний напрямок вітру, але для літніх умов. Початкові параметри: швидкість вітру 15 м/с, температура повітря 35°C. Цей варіант відрізняється від варіанту 1 швидкістю і щільністю потоку. Аеродинаміку димової труби та машинного залу наведено на рис. 4.26.



**Рисунок 4.26 – Поле середньої швидкості біля димової труби і машинного залу при русі потоку зправа наліво (поперечний розріз на різній висоті). Варіант 2: а – висота 10 м; б – висота 29 м; в – висота 31 м; г – висота 50 м; д – висота 80 м; є – висота 110 м. Напрямок вітру західний**

Зміна середнього коефіцієнта тепловіддачі по висоті димової труби відрізняється від попереднього варіанта, але має вище значення – за рахунок більшої швидкості вітру. Від основи труби до висоти 20 м значення

середнього коефіцієнта тепловіддачі більше розрахованого за формулою (1.1), але зі збільшенням висоти коефіцієнт тепловіддачі має нижче значення, ніж розрахункові дані, що показано на рисунку 4.27.



**Рисунок 4.27 – Зміна середнього по кутовій координаті коефіцієнта тепловіддачі по висоті димової труби. Варіант 2: пунктирна лінія – відхилення  $\pm 20\%$  від формули (1.1). Напрямок вітру західний**

#### 4.5 Порівняльний аналіз тепловіддачі біля конічної димової труби.

Аналізуючи графіки дослідження, що наведені на рис. 4.11, 4.21, 4.23, 4.25, 4.27, можна помітити, що середній по кутовій координаті коефіцієнт тепловіддачі зростає від основи димової труби до її гирла. Інтенсивність та характер зміни коефіцієнта тепловіддачі залежить від напрямку вітру. Велике значення на характер розподілу коефіцієнта тепловіддачі має профіль швидкості на межі майданчика ТЕС, що відповідає типу С (табл. 3.3). При швидкості вітру 5 м/с у варіанті 2 спостерігається найвищий коефіцієнт тепловіддачі (західний вітер, сезон – весна).

Інфраструктура теплової електростанції має значний вплив на аеродинаміку та теплообмін димової труби. При швидкості 5 м/с середня тепловіддача по всій висоті димової труби при різних початкових умовах має приблизно однакові значення (варіанти 1, 3, 5, 7). У варіантах, коли димова



труба розташована перед будівлею машинного залу або за ним (північний та південний напрямок вітру), за тієї швидкості не має значного впливу на тепловіддачу димової труби. За умов зростання швидкості від 5 м/с до 10 м/с при північному напрямку вітру теж не було помічено значного впливу на тепловіддачу. При проведенні розрахунків за формулою (1.1) для рівномірного профіля швидкості в області основи димової труби (перед димовою трубою) та в області будівлі машинного залу помічені як знижені (варіанти 3, 4), так і підвищені (варіанти 1, 2, 5, 7) значення результатів. При збільшенні висоти поза зоною дії будівлі машинного залу (висота понад 30 м) розрахунки за формулою (1.1) показують завищені значення даних (варіанти 3 – 5). Варіанти 2 та 6 приблизно співпадають за розрахунками за формулою (1.1).

#### **Висновки до Розділу 4**

1. Для виконання досліджень розроблено спрощену геометричну та комп'ютерну моделі майданчика ТЕС, які враховують основні елементи інфраструктури ТЕС. Розмір майданчика ТЕС із півдня на північ – 295 м, зі сходу на захід – 247 м. На поверхні труби задавалися граничні умови I роду (температура поверхні), у розрахунках використана RNG  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентності.

2. Розроблено програму досліджень, яка включає різний напрямок вітру та різні сезонні умови, притаманні Україні. Швидкість вітру в розрахунках змінювалася від 5 м/с до 15 м/с, температура – від  $(-5)^{\circ}\text{C}$  до  $+35^{\circ}\text{C}$ . На межах майданчика встановлено профіль швидкості, що відповідає умовам міської забудови біля майданчика (тип місцевості C).

3. Інфраструктура майданчика ТЕС істотно впливає на аеродинаміку обтікання димової труби та розподіл тепловіддачі по кутовій координаті на висоті труби. Як і при обтіканні одиночної труби, в кормовій зоні виявлено



періодичний характер зміни швидкості, тиску та теплообміну в цій ділянці труби вище будівлі машзалу.

4. Розподіл швидкості на поверхні димової труби суттєво залежить від напрямку вітру та його величини. При північному та південному напрямку вітру обтікання труби характеризується відривними зонами з високою тепловіддачею та несиметричним обтіканням труби. При східному та західному напрямку вітру обтікання труби практично симетричне з незначним впливом машзалу на структуру обтікання.

5. Використання рівняння (1.1), отриманого для рівномірного профілю швидкості, призводить до значних помилок у розрахунках тепловіддачі. У приземній зоні труби та в області машзалу тепловіддача може бути як заниженою, так і завищеною порівняно з результатами розрахунку, а вище за будівлю машинного залу (понад 30 м) це рівняння показує завищені результати. В окремих випадках (варіанти 2, 6) результати розрахунку приблизно співпадають з даними, отриманими за рівнянням (1.1).

#### **Список використаної літератури до Розділу 4**

- [1] П. Технологическая схема электростанции [електронний ресурс].  
Доступно: <https://studfile.net/preview/4616342/page:6/>
- [2] А. В. Борисенко, В. А. Пешко, «Основи теплової енергетики: конспект лекцій», КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2021.
- [3] Порівняння технологій для ТЕЦ: Аналітичний звіт [електронний ресурс].  
Доступно: <https://www.finnishenergyhub.com/post/district-heating-solutions>
- [4] Звітування про викиди в атмосферне повітря: як працює рішення для українських підприємств-забруднювачів [електронний ресурс]. Доступно:  
<https://rubryka.com/article/zvituvannya-pro-vykydy/>
- [5] А. П. Чиркова, А. А. Халатов, В. С. Олійник і О. В. Шіхабутінова «Аеродинаміка та теплообмін одиночної конічної труби при зовнішньому обтіканні», *Теплофізика та теплоенергетика*, т. 43, № 4, с. 25-33, 2021.  
<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2021.3>

- [6] А. П. Чиркова і А. А. Халатов «Теплообмін та аеродинаміка біля вертикальної конічної труби на майданчику ТЕС», *Вісник НТУ «ХПІ»: Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування»*, № 1(9), с. 58-63, 2022. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2022.01.07>
- [7] A. Khalatov, O. Shikhabutinova and A. Chyrkova “Aerodynamics and Heat Transfer Near the Conical Chimney Placed on the Thermal Power Station Site”, *Systems, Decision and Control in Energy*, № 5, vol. 481, p. 327-354, 2023. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_17)

## ВИСНОВКИ

Виконано теоретичне дослідження аеродинаміки та локального теплообміну при зовнішньому поперечному обтіканні одиночної конічної димової труби ТЕС, у нескінченному просторі, а також за наявності інфраструктури навколишнього простору та майданчика теплової електростанції. Досліджена димова труба висотою 40 м, діаметром в основі 1.7 м і в гирлі – 0.85 м. Запропоновано геометричну модель майданчика ТЕС, побудовано її комп'ютерну модель. При моделюванні швидкість вітру змінювалася від 5 м/с до 25 м/с, а його температура – від  $(-5)^{\circ}\text{C}$  до  $+35^{\circ}\text{C}$ . Розглянуто вплив інфраструктури навколишнього простору на профіль швидкості вітру, обґрунтовано модель турбулентності, виконані верифікація комп'ютерної моделі та тестове дослідження. Основні нові наукові результати виконаного дослідження наступні:

1. Для вивчення умов вперше виявлено та пояснено хвилеподібний характер зміни статичного тиску, швидкості потоку і коефіцієнта тепловіддачі в кормовій частині вертикальної конічної труби. Це пояснюється конічною формою труби, граничними умовами на поверхні та нерівномірним профілем швидкості вітру перед трубою.

2. Показано, що для труби у нескінченному просторі з рівномірним профілем швидкості вітру на вході конусність труби практично не впливає на середню тепловіддачу по всій висоті труби. Розподіл локальної тепловіддачі по висоті труби приблизно постійний з незначними максимумами біля земної поверхні, а також у середній частині труби.

3. Показано, що тип інфраструктури навколишнього простору (нерівномірний профіль швидкості) має значний вплив на розподіл тепловіддачі по висоті труби, котра може бути як вище, так і нижче середньої тепловіддачі по висоті труби. Хвилеподібний характер зміни тепловіддачі по висоті труби при цьому зберігається.

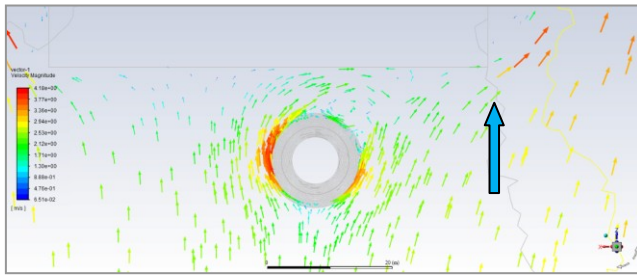
4. Показано, що інфраструктура майданчика ТЕС істотно впливає на аеродинаміку та теплообмін у кормовій частині труби. При цьому хвилеподібний характер швидкості, тиску і тепловіддачі по висоті труби зберігається тільки в області вище будівлі машинного залу.

5. Розрахунки тепловіддачі показали складний характер розподілу тепловіддачі по висоті труби на майданчику ТЕС, який залежить від умов її обтікання (швидкість та напрям вітру). Використання у розрахунках тепловіддачі рівняння для круглої циліндричної труби призводить до значних помилок, які у деяких випадках перевищують 20%.

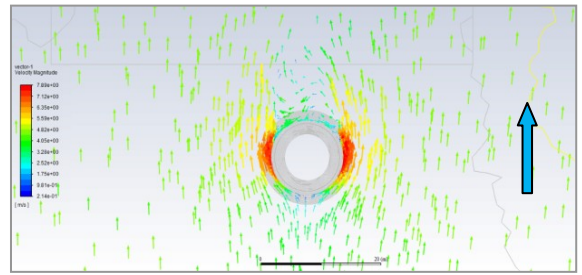
6. Характер розподілу швидкості біля поверхні труби суттєво залежить від напрямку вітру та його величини. Для досліджуваного майданчика ТЕС при північному та південному напрямку вітру обтікання труби несиметричне, воно характеризується високою тепловіддачею та відривними зонами у кормовій частині труби. При східному та західному напрямку вітру обтікання труби практично симетричне з незначним впливом будівлі машинного залу на фізичну структуру потоку.

7. Результати дослідження використано в ІТТФ НАН України при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи «Розроблення методів і засобів підвищення експлуатаційної надійності та екологічної ефективності димових труб теплоенергетичних установок», договір № 1-102/02, тема № 1.7.1.890. Вони можуть бути використані у проектних організаціях при виконанні практичних розрахунків аеродинаміки та теплообміну димових труб, а також при виконанні студентських НДР магістерського та бакалаврського рівня.

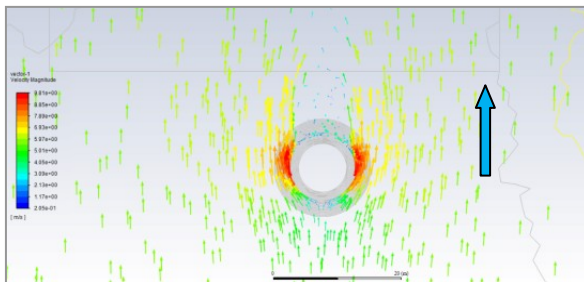
## ДОДАТОК А



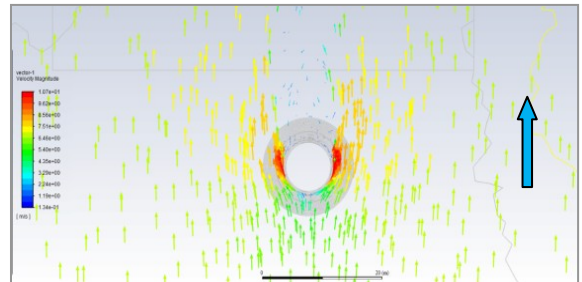
а



б

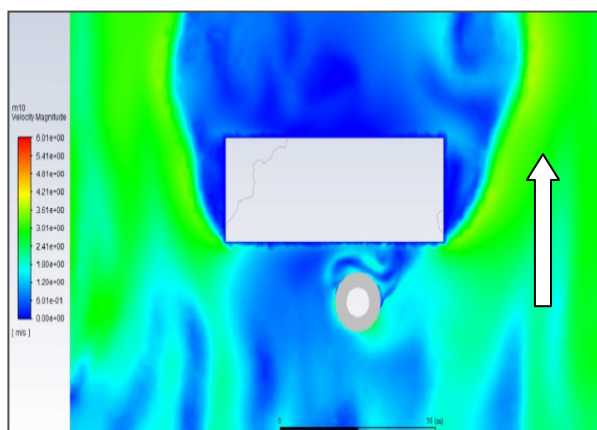


в

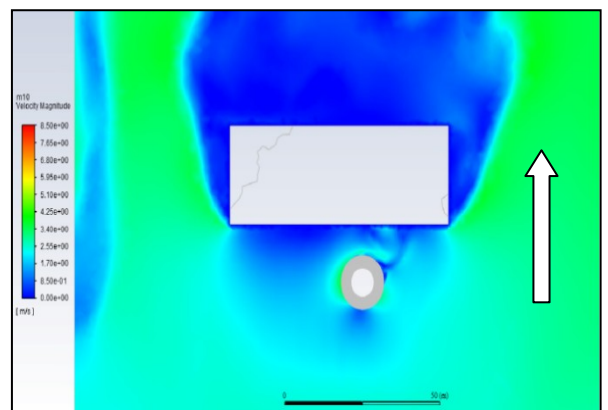


г

Рисунок А.1 – Аеродинаміка димової труби при поперечному обтіканні на різній висоті від землі: а – висота 20 м; б – висота 50 м; в – висота 80 м; г – висота 110 м Напрямок вітру північний



а



б

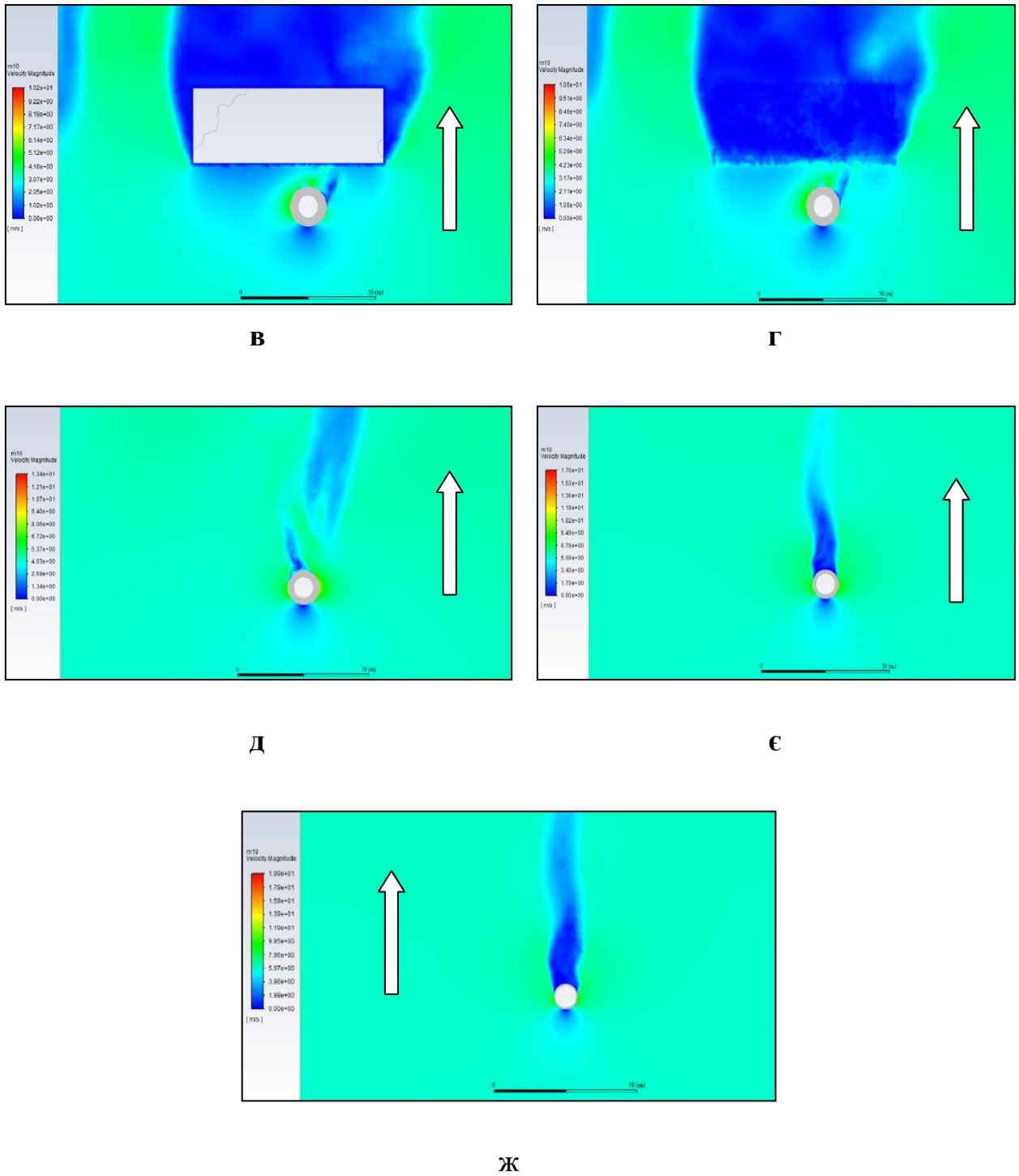


Рисунок А.2 – Поле середньої швидкості біля димової труби і машинного залу (вид зверху; поперечний розріз на різній висоті): а – висота 10 м; б – висота 20 м; в – висота 29 м; г – висота 31 м; д – висота 50 м; е – висота 80 м; ж – висота 110 м. Напрямок вітру північний

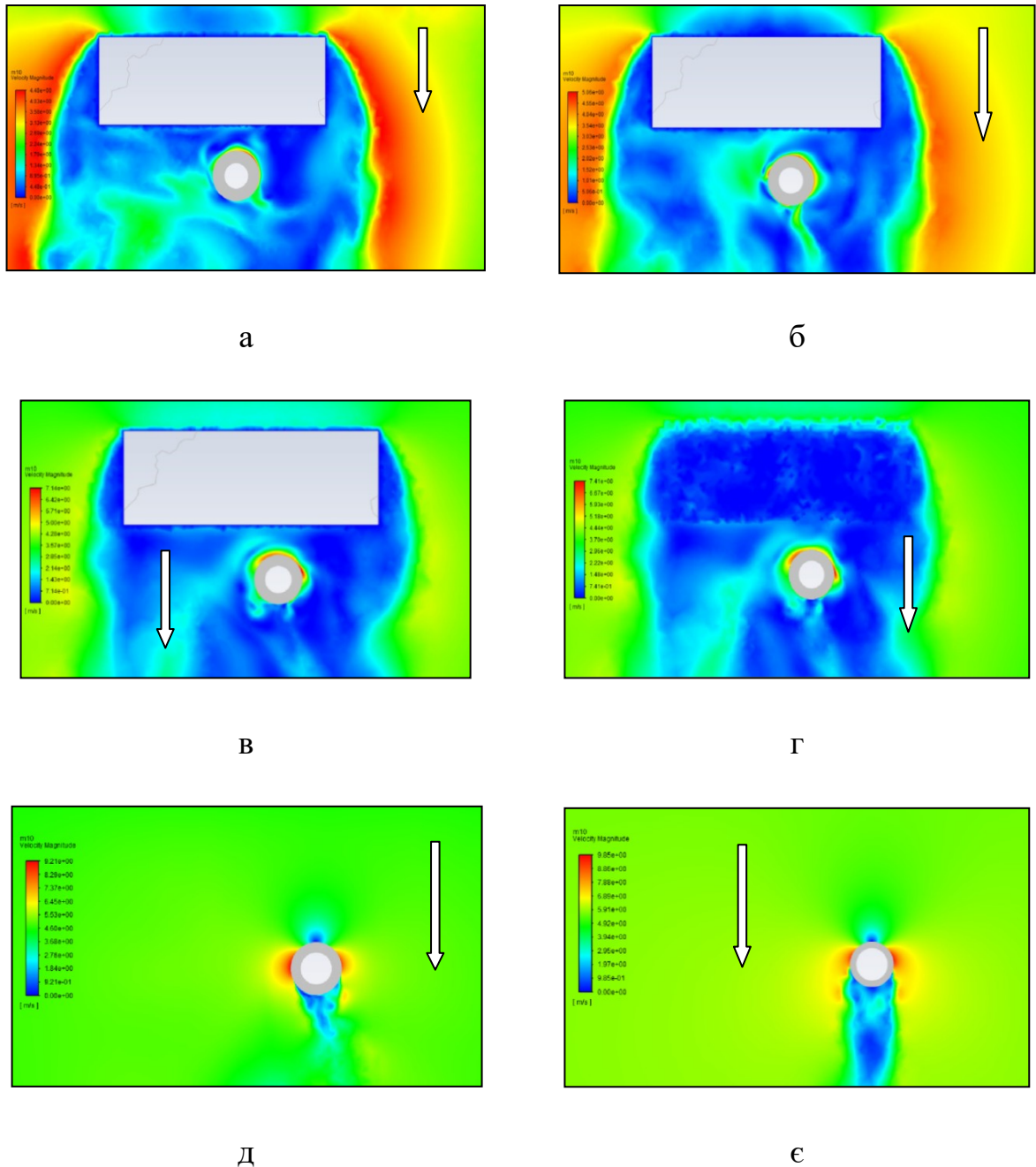


Рисунок А.3 – Аеродинаміка обтікання машинного залу і димової труби ТЕС  
(вид зверху; поперечний розріз на різній висоті):

а – висота 10 м; б – висота 20 м; в – висота 29 м; г – висота 31 м;

д – висота 50 м; е – висота 80 м. Напрямок вітру південний



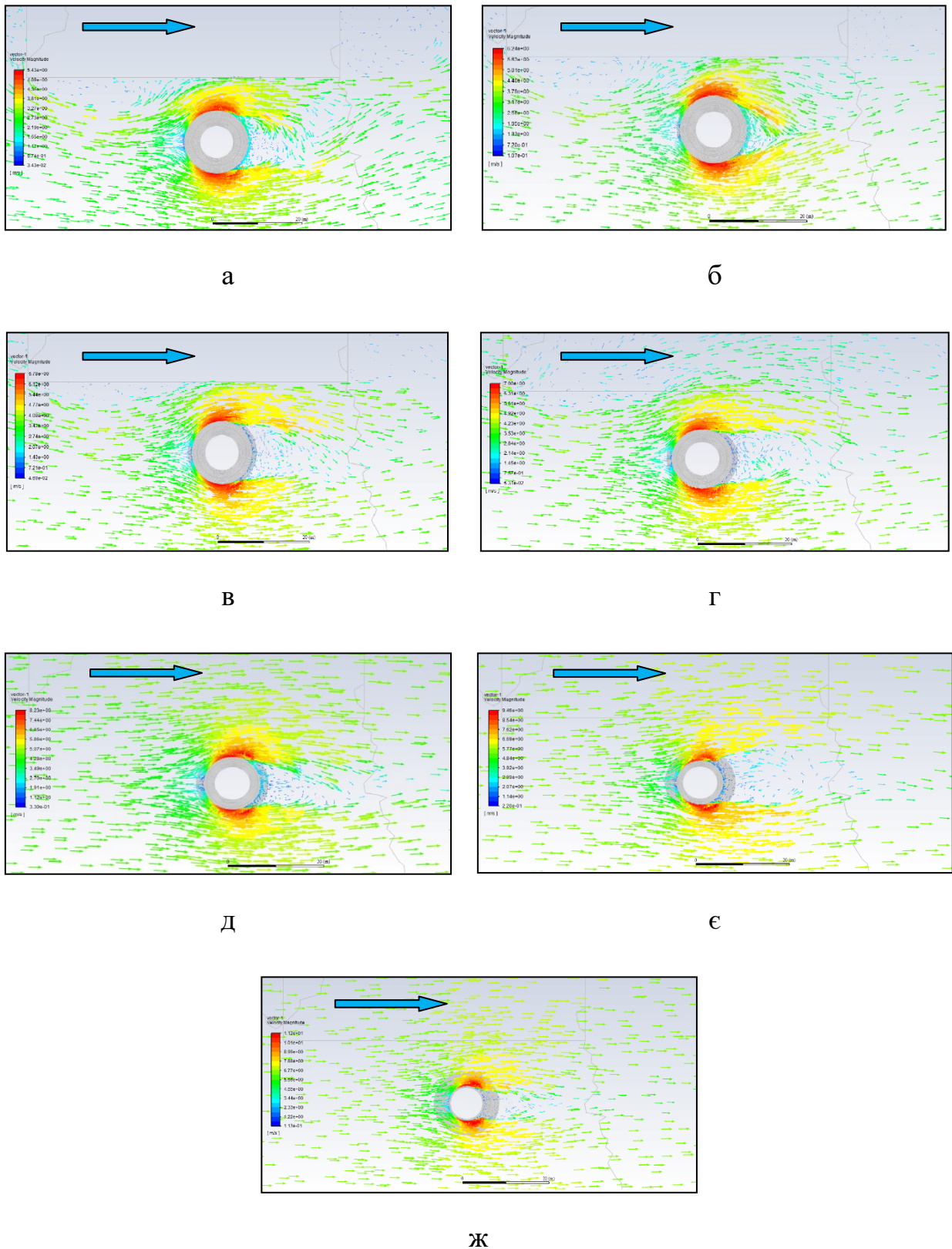


Рисунок А.4 – Аеродинаміка димової труби при поперечному обтіканні (різна висоті від землі): а – висота 10 м; б – висота 20 м; в – висота 29 м; г – висота 31 м; д – висота 50 м; є – висота 80 м; ж – висота 110 м. Східний напрямок вітру