ORCID: 0000-0003-0592-0845
А. П. Чиркова
аспірантка,
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна
ilcenkoanna777@gmail.com

DOI: 10.31651/2076-5851-2022-77-94 PACS: 47.85.Gj, 07.05.Tp, 05.70.Jk, 88.05.Qr, 44.05.+e, 44.20.+b

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ АЕРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ ОБТІКАННІ ОДИНОЧНОЇ КОНІЧНОЇ ТРУБИ НА МАЙДАНЧИКУ ТЕС

Димові труби теплових електростанцій - це важливий елемент складної інфраструктури промислового майданчика ТЕС. Проте при розрахунках димовим птубам приділяється не досттатньо уваги. В нашій державі більшість димових труб знаходиться в незадовільному стані, що призводить до негативних наслідків для екологічних умов навколишнього середовища та вплив на роботу ТЕС в цілому.

У роботі представлені результати чисельного моделювання аеродинаміки та теплообміну на поверхні конічної димової труби, розташованої на майданчику ТЕС. У роботі використана традиційна для задач данного класу RNG k-ε модель турбулентності. Розглянуті рівномірний і змінний по висоті профіль швидкості вітру, обумовлений інфраструктурою навколишнього середовища (різні типи місцевостіі) і промислового майданчика ТЕС. Обтікання димової труби має складний характер, з формуванням областей відривної течії та руйнування прикордонного шару. Показано, що розташування труби відносно обєктів інфраструктури промислового майданчика теплової електростанції відіграє важливу роль у розподілі швидкості, статичного тиску та теплообміну по висоті труби, які мають періодичний характер за висотою як при рівномірному профілі швидкості, так і в області вище за будівлю машинного залу при змінному профілі швидкості набігаючого потоку повітря. Показано, що використання рівняння двомірного обтікання круглого циліндра призводить до значної похибки при розрахунку тепловіддачі на зовнішній поверхні конічної димової труби. Такі результати розрахунків призводять до не точних обчислень та зниження строку експлуатації димових труб теплових електростанцій та руйнування їхньої поверхні. Також невірні розрахунки тепловіддачі димової труби ТЕС призодять до випадіння конденсату в її середині та також призводить до тріщин в конструкції димових труб.

Ключові слова: димова труба, аеродинаміка, теплообмін, коефіцієнт тепловіддачі, профіль швидкості, RNG *k-ε* модель турбулентності, ANSYS 2020-R1.

Умовні позначення:
w_z – профіль швидкості вітру
w_0 – середня швидкість набігаючого потоку
α – коефіцієнт тепловіддачі
z – відстань від поверхні Землі
к – коефіцієнт зміни швидкості вітру з висотою
ТЕС – теплова електростанція
Машзал – машинний зал

Вступ

Димова труба – важливий елемент складної інфраструктури будь якої теплової електростанції. Її основна задача викид відпрацьованих пічних газів, що є завершальним

етапом виробничого технологічного циклу виробництва теплової та електричної енергії. Димова труба має забезпечити вимоги по допустимій концентрації «шкідливих» продуктів горіння у атмосфері, які жорстко нормуються для охорони навколишнього середовища [1, 2]. У процесі спалювання палива на теплових електростанціях шкідливі гази містять тверді речовини та краплі рідини, що осідають на внутрішній поверхні димової труби та частково виводяться в атмосферу. Основними шкідливими речовинами є діоксид сірки (SO_2) та оксид азоту (NO_x). Ці елементи спричиняють негативний вплив на здоров'я людини при потраплянні в легені та можуть призводити до кислотних дощів і утворенні смогу, що завдає шкоду земельним та біоресурсам [3]. Щоб забезпечити надійну та довготривалу експлуатацію труби, потрібно забезпечити певні вимоги, серед яких обмеження випадіння вологи та шкідливих речовин із продуктів горіння усередині труби. Випадіння вологи призводить до постійної корозії в середині труби, утворенню щілин та тріщин, замерзанню вологи і танення льоду в них, руйнування поверхні та неконтрольованого припливу атмосферного повітря [4]. Проте нажаль більшість димових труб ТЕС знаходяться в незадовільному стані, що призводить до негативних наслідків робити теплових електростанцій в цілому. Димові труби продовжують експлуатувати, підтримуючи технічний стан поточними та капітальними ремонтами, хоча у значній частині димових труб вже вироблений передбачений термін експлуатації в 50 років.

Для запобігання випаданню вологи в даний час застосовуються різні методи. Серед них можна відмітити використання сорбентів, охолодження димових газів до температури, при якій вода конденсується і може бути відокремлена від газового потоку (теплообмінники або спеціальні конденсаційні системи), використання електростатичних пристроїв, використання фільтрів. Наприклад, у роботі [5] приведено приклад зменшення вологи в димових газах у конденсаційних теплоутилізаторах котельних установок. Ці методи можуть використовуватися окремо або в поєднанні залежно від конкретних умов та вимог електростанції.

Для досягнення меншої кількості шкідливих речовин, що містяться у викидах продуктів горіння, використовують декілька методів. Перший з них – це створення більш досконалого устаткування з очищення, зокрема високоефективних електрофільтрів, рукавних фільтрів, систем каталітичної нейтралізації, радіаційно-хімічного знешкодження і таке інше. Другий – це розробка нових екологічно чистих топкових пристроїв, що забезпечують мінімальні викиди за рахунок передових технологій спалювання палив. Найпростіший метод – зниження концентрації продуктів горіння у повітрі до безпечного рівня розсіюванням їх на більшу площу. Наприклад змішуванням підігрітих газів. Так в роботі [6] запропонований розрахунок оптимальних режимів додаткової подачі в основу димової труби закрученого підігрітого потоку повітря для упередження утворення конденсату та мінімізації екологічної шкоди. Інший підхід - це використання якомога вищих димових труб. Це призводить до низки складнощів - із збільшенням висоти зростає швидкісний напір вітру, зростання тиску на конструкції труб та інші, що пов'язані зі стійкістю та надійністю її експлуатації, що було зазначено в роботі [7, 12].

Забезпечення надійного тепловологістного режиму в димовій трубі тісно пов'язане з граничними умовами третього роду на її зовнішній поверхні (коефіцієнти тепловіддачі), які визначаються геометричною формою труби, її розмірами, інфраструктурою ТЕС і навколишнього простору, швидкістю та напрямом вітру, температурою навколишнього простору. Таким чином, зовнішня тепловіддача труби значною мірою визначається особливостями її обтікання та розташування на місцевості. Врахувати все фактори, що впливають, в розрахунках досить важко, тому в проектних

розрахунках використовується класичне рівняння для середньої по периметру циліндра тепловіддачі:

$$\alpha_0 = 7.3 \cdot w_x^{0.66} \quad , \qquad (1)$$

яке дає чималі похибки при розрахунках..

Мета справжньої роботи – дослідження аеродинаміки і середнього по периметру теплообміну на зовнішній поверхні одиночної конічної димової труби, розташованої у міській забудові, а також на території муніципальної ТЕС. Аналізуються зимові, літні та осінні умови експлуатації труби. Враховуючи складність експериментального дослідження цієї проблеми, у роботі використано комп'ютерне моделювання, засноване на чисельному розв'язанні диференціальних рівнянь руху та енергії з відповідними граничними умовами.

1. Чутливість сітки і модель турбулентності

На початковому етапі було проведено дослідження з метою визначення оптимальних параметрів сітки для умов тепловіддачі. При аналізі розглянуто зовнішнє обтікання циліндричної труби діаметром 1700 мм, і довжиною 8000 мм, швидкість набігаючого потоку змінювалася від 5 до 25 м/с. Вивчені різні варіанти сіток з параметрами, що впливають на відстань першого вузла від стінки циліндра в діапазоні 0.02–12 мм, а також на швидкість збільшення розмірів елементів по мірі віддалення від області інтересу (Growth rate *GR*). Сіткові моделі згенеровано з наступними параметрами: orthogonal quality > 0.07 (рекомендовано від 0.05); skewness < 0.9 (рекомендовано до 0.91).

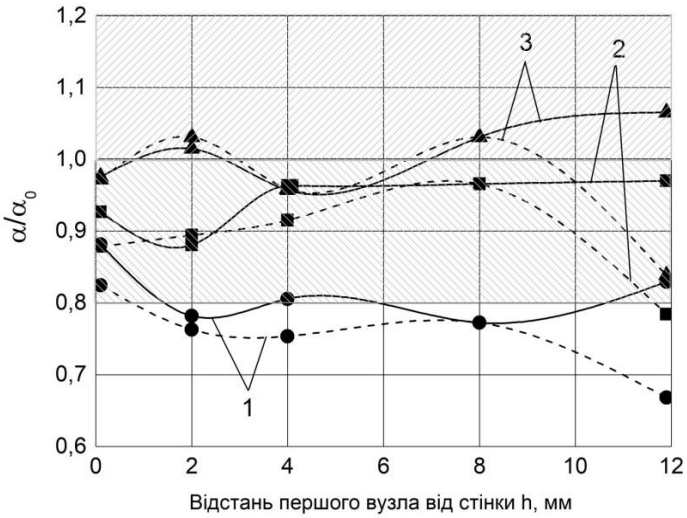


Рис. 1 – Залежність співвідношення α/α_0 від відстані першого вузла до стінки: (—) Варіант 1, (- - -) Варіант 2; Швидкість набігаючого потоку: 1 (●) – 5 м/с, 2 (■) – 15 м/с, 3 (▲) – 25 м/с.

Fig. 1 – Dependence of the ratio α/α0 on the distance of the first node to the wall: (—) Option 1, (- - -) Option 2; The speed of the oncoming flow: 1 (●) – 5 m/s, 2 (■) – 15 m/s, 3 (▲) – 25 m/s.

З рис. 1 можна помітити, що варіанти сіток 1 та 2 на проміжку 0.02–8 мм є приблизно подібними за результатами моделювання (α – чисельне моделювання; α_0 – розрахунок за рівнянням 1). В результаті аналізу рис.1 визначено, що при відстані першого вузла від стінки циліндра та області, що нас цікавить (Growth rate *GR*), більше 8 мм варіант 2 демонструє нестабільність, а значення коефіцієнта тепловіддачі, отримані за формулою (1), відхиляються від очікуваних значень більш ніж на 20%. В той же час

при h > 8 мм варіант 1 демонструє стабільність розрахунку. В результате для послідующих розрахунків була обрана область з параметрами сіткової моделі GR = 1.1; h = 8 мм (кількість вузлів сітки 60109, число елементів 155908). В роботі обрана традиційна для задач даного класу *RNG k-ε* модель, пристінна функція Enhanced Wall Function та алгоритм розв'язку для з'єднання швидкісного тиску в стійких потоках Simplex.

2. Аеродинаміка і теплообмін біля одиночної конічної димової труби: рівномірний профіль швидкості набігаючого потоку

Для дослідження взято одиночну конічну трубу ТЕС, розташовану вертикально на земній поверхні (рис. 2). Параметри труби: висота – 40 м; діаметр в основі – 1.7 м; діаметр в устi – 0.85 м. Комп'ютерна модель розрахована в програмі ANSYS2020-R1 (однорідна область), де за середовище взято повітря. Конусна труба знаходиться на відстані 12 калібрів від входу, відстань до виходу з розрахункової області складає 28 калібрів. На першому етапі дослідження розглядався рівномірний профіль швидкості вітру перед трубою, який задавався на відстані 38.3 м від основи труби. В якості граничних умов використовувалися граничні умови першого роду (температура поверхні труби 100°C). Димова труба умовно розділена на 40 секцій (Zones), кожна із яких становила 1 м.

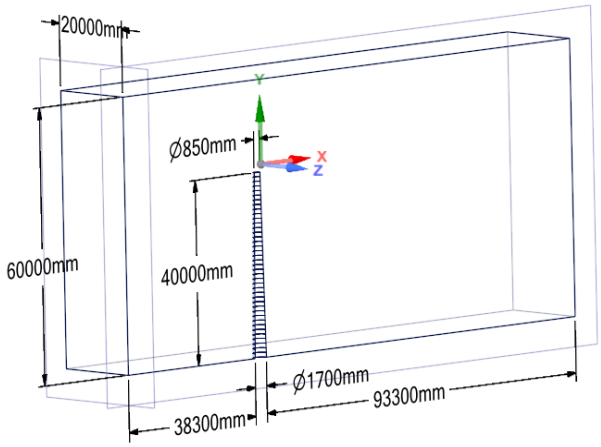
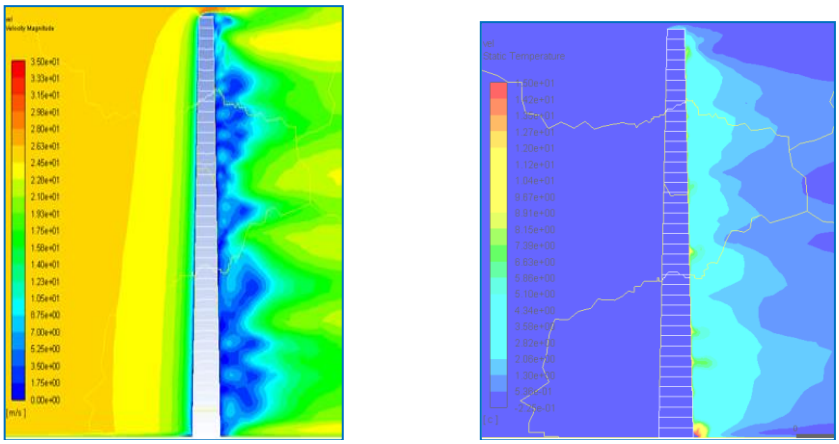


Рис. 2. Геометрична модель: одиночна конічна труба
Fig. 2. Geometrical model: single conical chimney

На рис. 3 показано поле швидкості та температури потоку при поздовжньому перерізі труби. З рисунків видно, що в кормовій області по всій висоті труби зміна поздовжньої швидкості та температури потоку має періодичний характер, який кореннім чином відрізається від вихрової структури в кормовій області при обтіканні безконечного циліндра постійного перерізу. На рис. 4 показано стовпчикову діаграму періодичної зміни по висоті конічної труби усередненої по кутовій координаті коефіцієнта тепловіддачі. Максимальне значення коефіцієнта тепловіддачі знаходиться в Zone (21-22) і в вихідній частині труби Zone (39-40). Періодичність коефіцієнта тепловіддачі в кормові зоні добре видно на рис. 5.



а) б)

Рис. 3 – Поле швидкості (а) та температури (б) повітря при обтіканні одиночної конічної труби. Рівномірний профіль швидкості набігаючого потоку. Швидкість набігаючого потоку 25 м/с

Fig. 3 – Velocity (a) and temperature (b) field of air flowing around a single conical pipe. A uniform velocity profile of the oncoming flow. The speed of the oncoming stream is 25 m/s

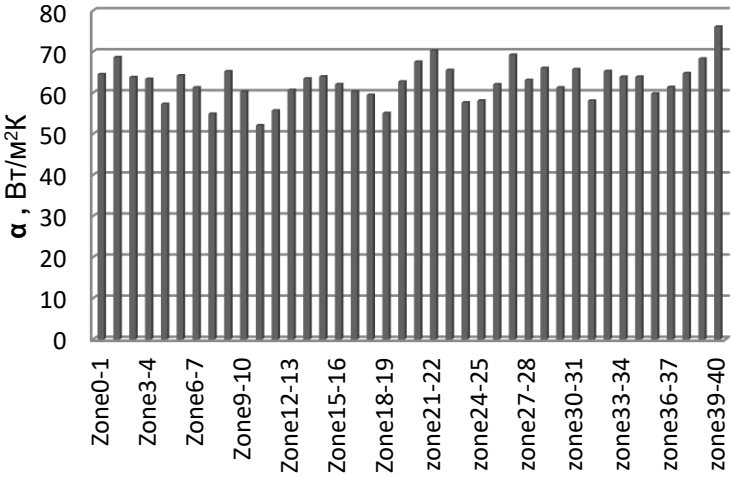


Рис. 4 – Зміна коефіцієнта тепловіддачі для 40 секцій по висоті конічної труби. Рівномірний профіль швидкості набігаючого потоку. Швидкість набігаючого потоку 25 м/с

Fig. 4 – Change of the heat transfer coefficient for 40 sections along the height of the conical chimney. A uniform velocity profile of the oncoming flow. The speed of the oncoming stream is 25 m/s

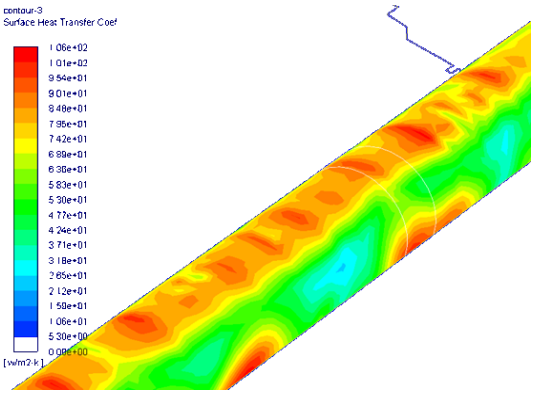


Рис. 5 - Коефіцієнти тепловіддачі на поверхні труби та в Zone (21-22) зокрема. Рівномірний профіль швидкості набігаючого потоку. Швидкість набігаючого потоку 25 м/с

Fig. 5 - Heat transfer coefficients on the chimney surface and in Zone (21-22) in particular. A uniform velocity profile of the oncoming flow. The speed of the oncoming stream is 25 m/s

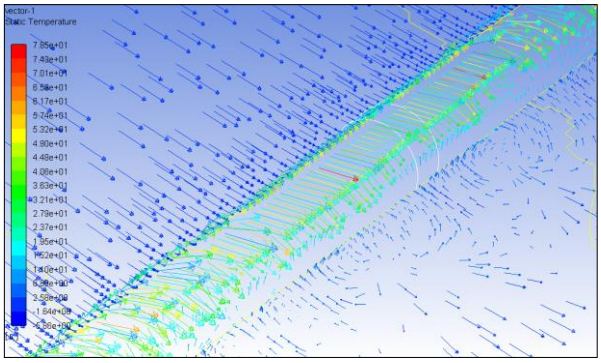


Рис. 6 – Вектори швидкості повітря при обтіканні конічної труби та в Zone (21-22) зокрема. Рівномірний профіль швидкості набігаючого потоку. Швидкість набігаючого потоку 25 *м/с*

Fig. 6 – Air velocity vectors when flowing around a conical chimney and in Zone (21-22) in particular. A uniform velocity profile of the oncoming flow. The speed of the oncoming stream is 25 m/s

Щоб пояснити розподіл коефіцієнтів тепловіддачі на рис. 6 наведено вектори швидкості руху повітря при поперечному обтіканні конічної труби. За конусною трубою виникають періодичні зони циркуляції, які відповідають за теплообмін за «точкою відриву». Інтенсивність циркуляції в таких зонах изменяется від застійної – коли потік рухається переважно вздовж циліндру, слабо перемішуючись с основним потоком, до зворотної циркуляції. Результаті, представленні на рис. 7, показують, що середній по висоті конічної труби коефіцієнт тепловіддачі відповідає результатам розрахунку для круглого нескінченного циліндра, такі особливості вихрової структури в кормовій зоні і форма труби слабо впливають на середній теплообмін.

Статичний тиск по висоти труби також демонструє періодичну зміну по висоті труби в зоні відриву (рис. 8). При аналізі виявлено зони зниженого тиску, зокрема в Zone (21-22) та Zone (39-40), які характеризуються високими значеннями коефіцієнта тепловіддачі.

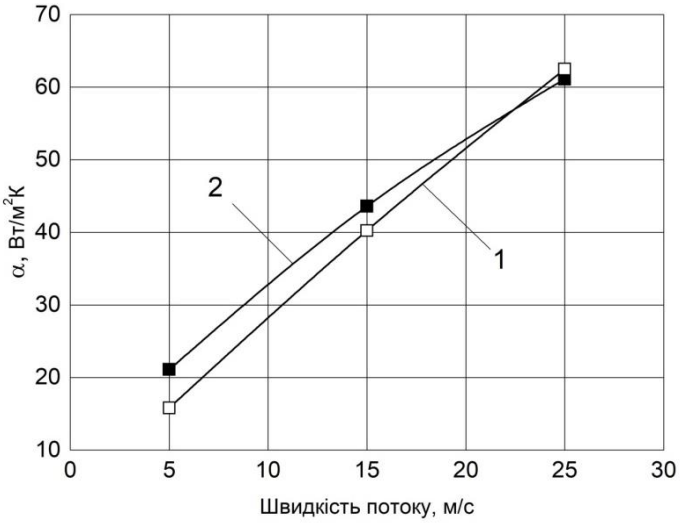


Рис. 7

Рис 7 – Середній по висоті труби коефіцієнт тепловіддачі від середньої швидкості набігаючого потоку: 1 – Розрахунок за рівнянням (1); 2 – Результати моделювання

Fig. 7 – The average heat transfer coefficient along the height of the chimney from the average velocity of the incoming flow: 1 – Calculation according to equation (1); 2 – Simulation results

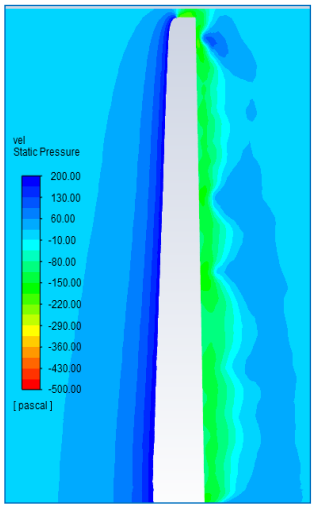


Рис. 8

Рис.8 – Статичний тиск по висоті конічної труби. Швидкість набігаючого потоку 25 м/с

Fig. 8 – Static pressure along the height of the conical chimney. The speed of the oncoming stream is 25 m/s

Таким чином, основною особливістю обтікання конічної димової труби є періодичний характер зміни локальних значень швидкості, температури та статичного тиску за висотою труби у її кормовій ділянці. Це пов'язано з умовами обтікання конічної труби і нульовими граничними умовами на поверхні Землі. Такий характер вихрової структури виявлено вперше, що корінним чином відрізняється від вихрової структури потоку в кормовій області безкінечного круглого циліндра постійного перерізу при поперечному обтіканні [8, 9].

3. Аеродинаміка та теплообмін біля одиночної конічної димової труби: вплив інфраструктури навколишнього середовища (типа місцевості)

При дослідженни использовна одиночна конічна труба, розташована на земній поверхні (рис. 2). В якості граничних умов для швидкості вітру біля поверхні Землі використано профіль, який рекомендується в работі [10]:

$$w_z = w_0 \cdot k(z), \qquad (2)$$

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

$$k(z) = k_{10} \cdot (\frac{z}{10})^a. \qquad (3)$$

Значення параметрів k_{10} і a підбираються виходячи з типу навколишнього середовища [4]. В роботах [10, 13] розглянуто три типи навколишнього середовища (місцевості):

Тип A: Відкриті узбережжя морів, озер і водосховищ, сільські місцевості, в тому числі з будівлями висотою менше 10 м, пустелі, степи, лісостепу, тундра (k_{10} = 1.0; a = 0.30).

Тип B: Міські території, лісові масиви та інші місцевості, рівномірно покриті перешкодами висотою більше 10 м (k_{10} = 0.65; a = 0.4).

Тип C: Міські райони з щільною забудовою будинками заввишки більше 25 м (k_{10} = 0.4; a = 0.50).

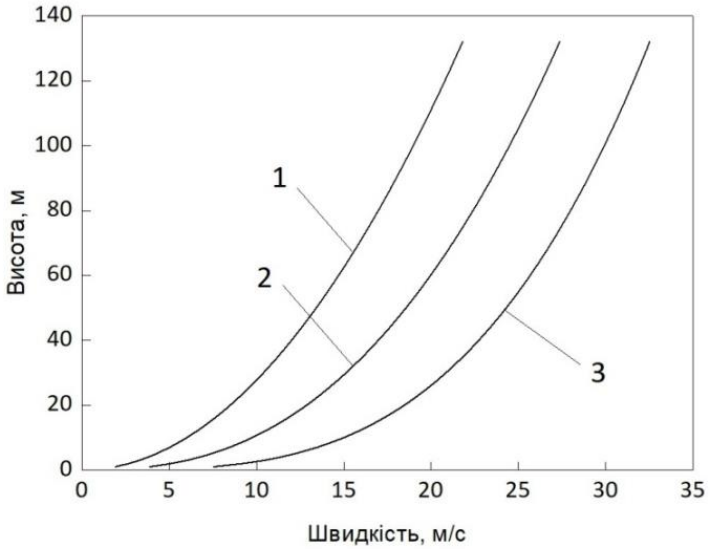


Рис. 9 – Профіль швидкості вітру для різних типів навколишнього середовища**.** 1 – тип місцевості А; 2 – тип В; 3 – тип С. Середня швидкість вітру 10 м/с

Fig. 9 – Wind speed profile for different types of environment. 1 – terrain type A; 2 – type B; 3 – type C. The average wind speed is 10 m/s

З рис. 9 випливає, що профілі швидкості вітру для різних типів місцевості виявляють нелінійний характер. При проведенні розрахунків профіль швидкості був визначений на відстані 38 300 мм від основи труби, як показано на рис. 1.

На рис. 10 показано середнє по висоті труби коефіцієнти тепловіддачі для різних значень швидкості вітру. З відси слідує, що тип місцевості має значний вплив на величину коефіцієнта тепловіддачі. Це підтверджує необхідність враховувати тип місцевості та профіль швидкості вітру перед трубою при оцінці тепловіддачі біля конічної труби.

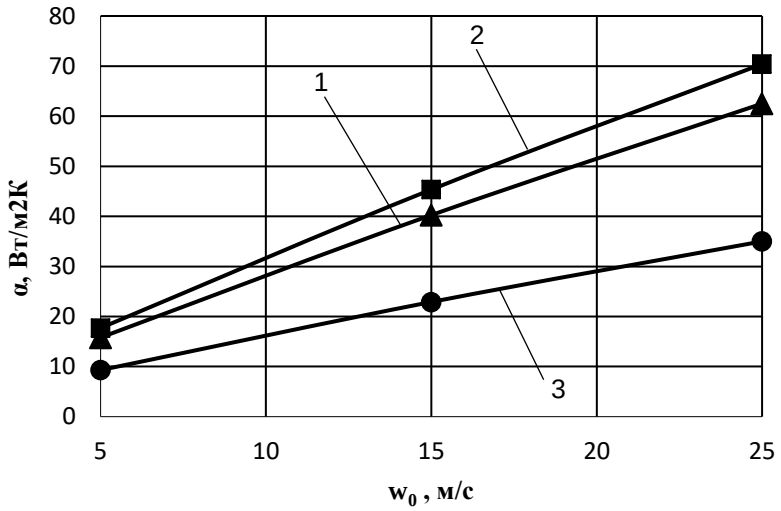


Рис. 10 – Середній по висоті конічної димової труби коефіцієнт тепловіддачі: 1 – Рівномірний профіль швидкості, 2 – Тип місцевості А, 3 – Тип місцевості С.

Fig. 10 – The average height of the conical chimney heat transfer coefficient: 1 – Uniform speed profile, 2 – Terrain type A, 3 – Terrain type C.

4. Аеродинаміка та теплообмін біля димової труби ТЕС: вплив інфраструктури навколишнього середовища ТЕС

Теплова електростанція (ТЕС) – це комплекс енергетичних установок, обладнання та апаратури, що призначені для перетворення палива на електричну та теплову енергію. Зазвичай на промисловому майданчику ТЄС розташовані: головний корпус; мазутне та оливне господарства; корпус подрібнення палива; будівлі підсобних виробництв; пікова водогрійна котельня, градирні; димові труби; газорегулюючий пункт, очисні споруди стічних вод, насосні станції циркуляційного, протипожежного та питного водопостачання та інші об'єкти [11].

Враховуючи основні складові, було створено спрощену 3D-модель для дослідження, до її складу входять (рис. 11): машинний зал, підстанція, адміністративна будівля, склад та дві градирні. Розмір майданчика ТЕС з Півдня на Північ – 295 м, зі Сходу на Захід – 247 м. Димова труба має діаметр в основі D = 15 м, діаметр в усті d = 7.5 м (конусність 0.625), висота – 120 м. Димова труба розташована несиметрично відносно будівлі машинного залу.

Сіткова модель інфраструктури ТЕС представлена на рис. 11, кількість вузлів сітки – 1 137 781,число елементів – 4 741 859, мінімальна ортогональна якість – 0.1, максимальний перекіс – 0.89. В розрахунках використовувалась RNG k-ε модель турбулентності. Густина повітря не залежна від температури на вході в розрахунковий об’єм, силами тяжіння знехтувано. Температура поверхні труби задавалася постійною та рівною 100ºС, швидкість вітру змінювалася w_0 від 5 до 25 м/с.

У роботі [12] вивчено два напрямки вітру, які наведені в таблиці. Розглянуто два сезони експлуатації ТЕС (літо, зима) з різною температурою повітря при середньой швидкості вітру 5 м/с. Профіль швидкості на межі майданчика ТЕС ставився відповідно до інфраструктури навколишнього простору навколо майданчика ТЕС (тіп місцевости С). Таким чином, приведенні ниже результаті для кожного варіанта отражают совместное влияние інфраструктурі навколишнього середовища (тіпа місцевости) та майданчика ТЕС.

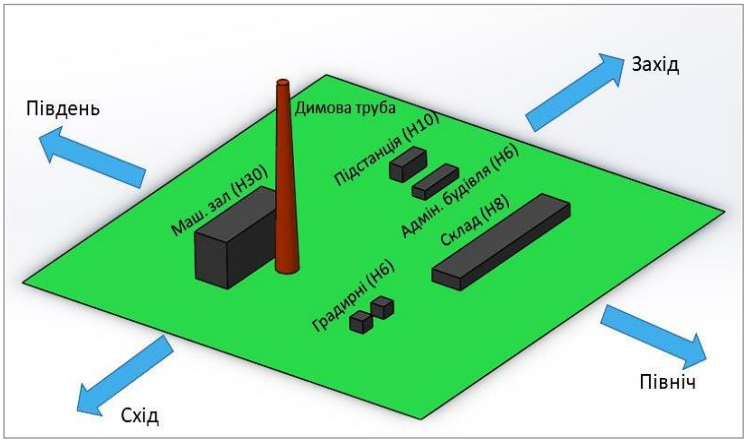


Рис. 11 – Спрощена інфраструктура теплової електростанції (загальний вигляд)
Fig. 11 – Simplified infrastructure of a thermal power plant (general view)

Таблиця 1. Вихідні дані для розрахунку
Table. Output data for calculation

Варіанти розрахунку	Швидкість повітря w_0, м/с	Температура t, °C	Напрямок повітря	Сезон
Варіант 1	5	-5	Північ – Південь	зима
Варіант 2	5	26	Північ – Південь	літо
Варіант 3	5	-5	Південь – Північ	зима

Варіант 1. Напрямок повітря Північ – Південь (зима)

На рис. 12 зображено поле швидкості в плоскості Z-Y. Так як за димовою трубою розташовується машзал (висота 30 м, ширина 70 м), який є перешкодою для потоку, що обтікає трубу, то обтікання машинного залу має характер тіла, що погано обтікається, з відривом потоку на бічних поверхнях (рис. 13). Несиметричне розташування димової труби щодо центру машзалу приводить до несиметричного обтікання будівлі машзала. У поперечному напрямку біля труби формується «крилеподібна» структура висотою понад 30 м, яка спадає по мірі віддалення від труби. Як і при обтікання одиночної труби (рис. 3) в кормовій частині труби спостерігається змінний характер зміни швидкості по висоті труби в кормовій частині в області вище будівлі машинного залу (рис. 12).

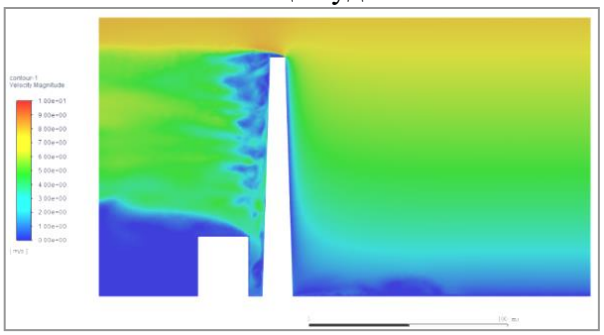


Рис. 12 – Поле повздовжньої швидкості вітру при обтіканні одиночної конічної труби, розташованої перед будівлею машинного залу
Fig. 12 – Longitudinal wind velocity field when flowing around a single conical chimney located in front of the engine room building

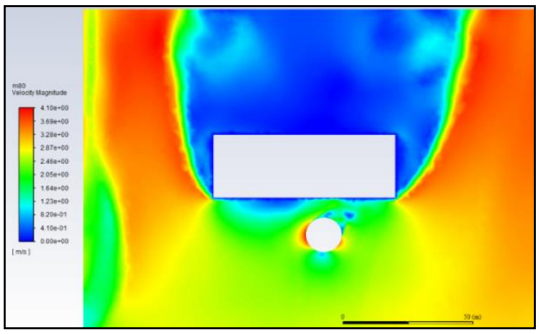
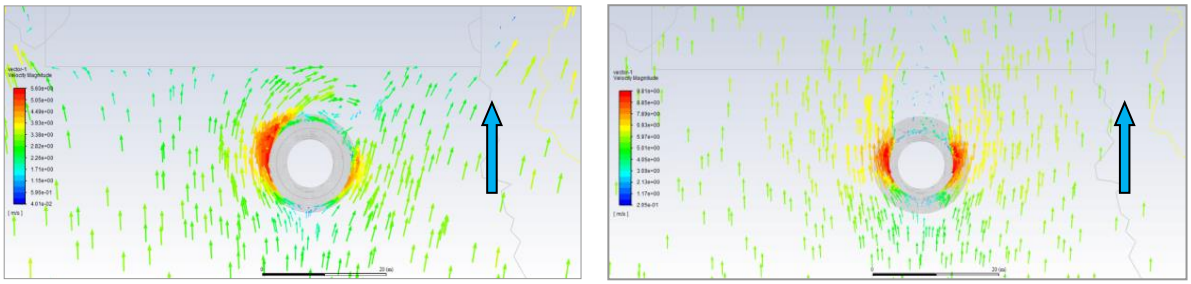


Рис.13 – Поле швидкості при обтіканні одиночної конічної труби на майданчику ТЕС. Висота перерізу 29 м

Fig. 13 – Velocity field when flowing around a single conical chimney at the TPP site. The height of the section is 29 m



а) б)

Рис. 14 – Аеродинаміка димової труби ТЕС на різній висоті від Землі: а – Висота 29 м; б – Висота 80 м

Fig. 14 – Aerodynamics of a TPP chimney at different heights from the Earth: a – Height 29 m; b - Height 80 m

На рис. 14 наведено векторне поле швидкості. На висоті 29 м в області нижче даху машзала обтікання труби є несиметричним, що обумовлено несиметричним розташуванням труби щодо здания машзалу. В області машзалу (рис. 14-а) вихрова структура за трубою зміщена вправо, а сам вихор коротший і має більш цілісний і однонаправлений характер (за годинниковою стрілкою). Зона відриву потоку розташована в лівій частині труби (в напрямку потоку), причому її ширина значна за розміром. Вище будівлі машзалу (рис. 14-б) гомогенна циркуляція повітря за трубою розбивається на кілька менших за розмірами, але різнонаправлених вихорів с переменним характером зміни швидкості по висоті труби в кормовій області. Збурення від будівлі поступово затухають і обтікання труби стає симетричним з приблизно однаковою областю відриву потоку зліва та з права. Таким чином, конічна форма труби є основною причиною формування специфічної вихрової структури в кормовій області труби.

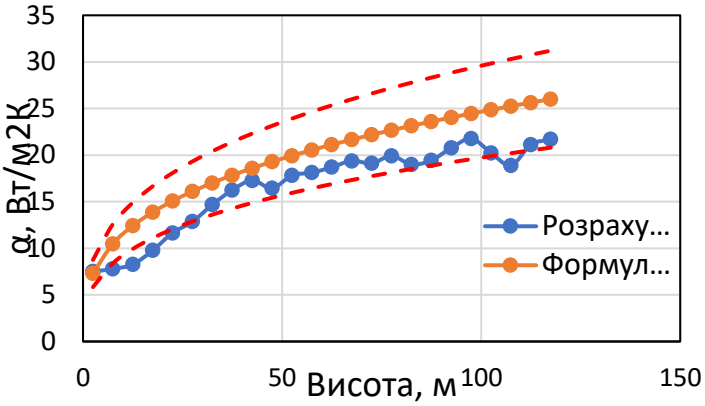


Рис. 15 – Усереднений по кутовій координаті коефіцієнт тепловіддачі: зміна по висоті димової труби. Напрямок повітря Північ – Південь (зима); пунктирна лінія – відхилення ±20 % від формули (1)

Fig. 15 – Heat transfer coefficient averaged over the angular coordinate: change in the height of the chimney. Air direction North - South (winter); dashed line – ±20% deviation from formula (1)

Дані по кутовій координаті коефіцієнту тепловіддачі біля димової труби приводяться на рис. 15. Як випливає, по всій висоті труби тепловіддача нижче, ніж розрахована за рівнянням (1). В зоні впливу будівлі машзалу (до висоти 30 м) відхилення від формули (1) складає біля 20% і навіть нижче у бік зменшення. Це зумовлено зниженням швидкості потоку та несимметричним характером обтікання труби. В області 30–80 м тепловіддача приблизно на 10% нижче за розраховану по формулі (1), а в області 80–110 м зменшення тепловіддачі збільшується до 20%.

Варіант 2. Напрямок повітря Північ – Південь (літо)

Це той же напрямок вітру, що і для варіанта 1, але в літній період. Аеродинаміка обтікання димової труби зберігається практично такий же, як і в зимовий період. Різниця в розподіл швидкості потоку біля труби обумовлено тільки через зміну щільності потоку. Незначне зниження тепловіддачі (рис. 16) по висоті труби в літній період в порівнянні з зимовим періодом обумовлений вплив температурного фактора.

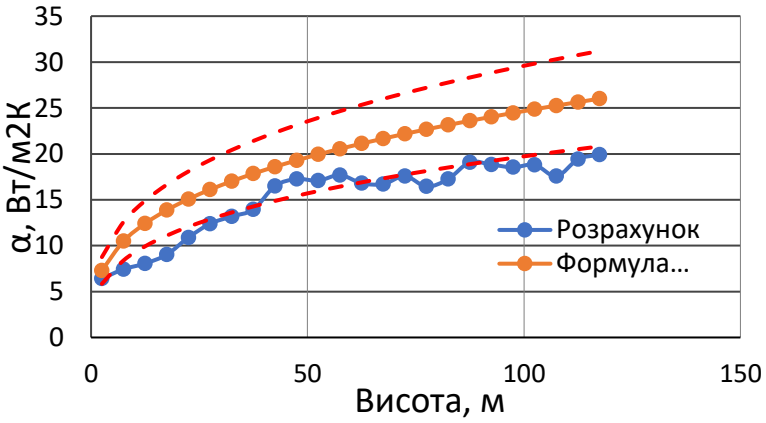


Рис. 16 – Усереднений по кутовій координаті коефіцієнт тепловіддачі: зміна по висоті димової труби. Напрямок повітря Північ – Південь (літо); пунктирна лінія – відхилення ±20 % від формули (1)

Fig. 16 – Heat transfer coefficient averaged over the angular coordinate: change in the height of the chimney. Air direction North - South (summer); dashed line – ±20% deviation from formula (1)

Варіант 3. Напрямок повітря Південь - Північ (зима)

Варіант 3 розглядає зворотний напрямок вітру за однакових граничних умов з варіантом 1. Так як будівля машзалу висотою 30 м розташовується перед димовою трубою висотою 120 м (рис. 17), то це створює перешкоду потоку, що набігає і «затінення» частини труби будинком. Отже потік, що набігає, огинає будівлю зліва, праворуч і зверху з відривом потоку на бокових поверхнях машзала та зниженою швидкістю потока за машзалом (близько 0.5 м/с). «Слід» за будівлею машзала несиметричний (рис. 17), що зумовлено несиметричним розташуванням димової труби щодо будівлі машзалу та впливом інфраструктури ТЕС.

На рис. 18 наводиться аеродинаміка обтікання машзала та димової труби в перерізі Z-Y. Будівля машзала створює «затінення» потоку, що набігає, і за ним утворюється зона зниженої швидкості. Вище будівлі машзала по висоті труби спостерігаються періодичні коливання швидкості в кормовій ділянці, а гирло труби обтікається зі швидкістю близькою до швидкості набігаю чого потоку.

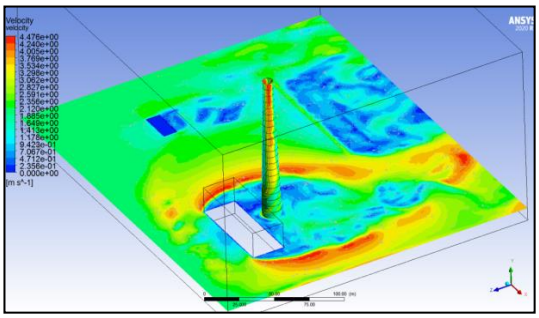


Рис 17 – Аеродинаміка майданчика ТЕС. Напрямок повітря Південь - Північ. Висота перерізу 10 м

Fig. 17 – Aerodynamics of the TPP site. The air direction is South - North. The height of the section is 10 m

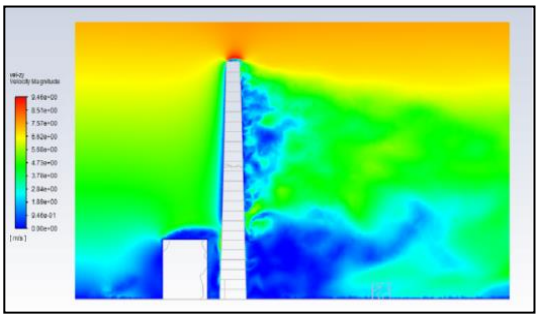
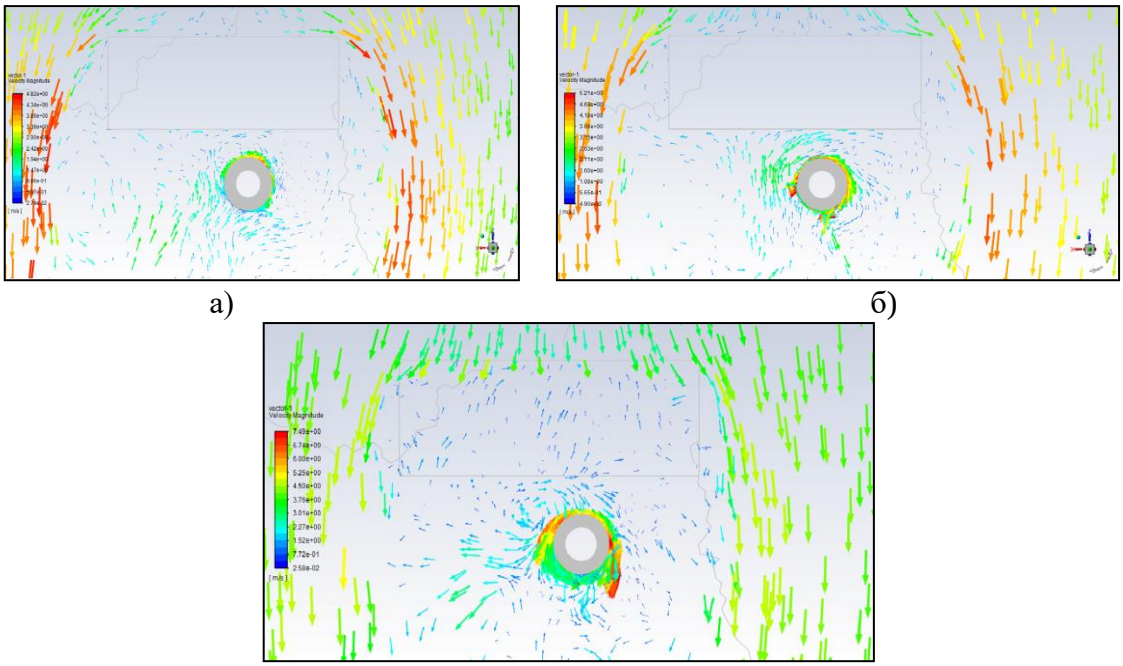


Рис. 18 – Поле швидкості ветру при обтіканні одиночної конічної труби, розташованою на майданчику ТЕС

Fig. 18 – Wind speed field when flowing around a single conical pipe located on the TPP site



а) б)

в)

Рис. 19 – Усереднений по кутовій координаті коефіцієнт тепловіддачі: зміна по висоті димової труби. Пунктирна лінія – відхилення ±20 % від формули (1);висота перерізу: а –10 м; б – 20 м, в – 31 м

Fig. 19 – Heat transfer coefficient averaged over the angular coordinate: change in the height of the chimney. Dashed line – ±20% deviation from formula (1); section height: a – 10 m; b – 20 m, c – 31 m

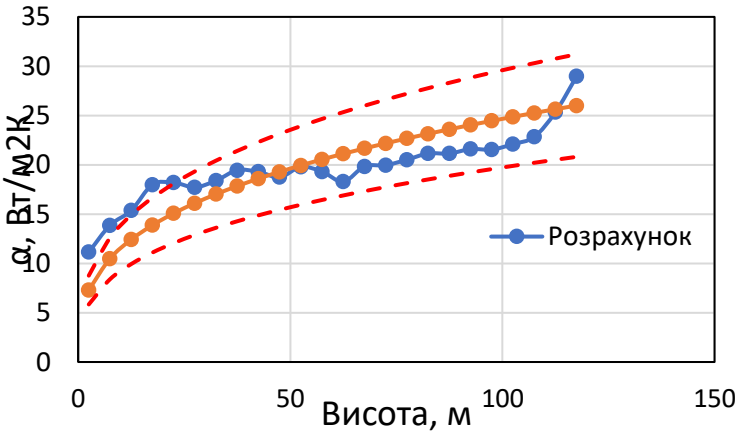


Рис. 20 – Усереднений по кутовій координаті коефіцієнт тепловіддачі по висоті димової труби. Напрямок повітря Південь – Північ (зима); пунктирна лінія – відхилення ± 20% від формули (1)

Fig. 20 – Heat transfer coefficient averaged over the angular coordinate along the height of the chimney. Air direction South - North (winter); dashed line – deviation ± 20% from formula (1)

На рис. 19 розглянута аеродинаміка обтікання машзала та димової труби на різній висоті від земної поверхні. На висоті до 31 м труба обтікається потоком із малою швидкістю. Складна структура потоку формується за рахунок відриву потоку на бічних поверхнях будівлі та частково на його даху. Отже на висоті 31 м (вище даху машзала) на поверхні труби формується слабка зона підвищеної швидкості, на висоті труби 50 м і

більше поступово формується симетрична структура обтікання труби з різною довжиною «хвоста» за димовою трубою. Аналіз рис. 19 також показує, що в зоні «затінення» труби будинком машзала обтікання труби носить нерегулярний вихровий характер із формуванням граничних ліній – слідів обтікання будівлі машзала. Примежовий шар поверхні труби не утворюється, але на висоті 31 м и віще обтікання труби уже має характер зі зміщенням вихрової структури вправо.

Результати розрахунку усередненого по кутовій координаті коефіцієнта тепловіддачі представлені на рис. 20. До висоти труби 50 м розрахункова тепловіддача перевищує дані, отримані за рівнянням для одиночної труби при рівномірному профілі швидкості потоку, що набігає. В області 50–110 м, як і у варіанті 1, середня тепловіддача приблизно на 10% нижче за дані розрахунку, але біля гирла труби має місце локальне збільшення тепловіддачі.

Висновки

1. Димова труба ТЕС є одним із важливих елементів інфраструктури ТЕС, що забезпечує екологічно чистий викид продуктів згоряння в атмосферу. Важливою умовою її експлуатації є відсутність конденсації вологи на стінку труби для виключення її корозії та поступового руйнування.
2. Інфраструктура навколишнього простору та майданчика ТЕС, а також її розташування щодо будівлі машзалу, відіграє важливу роль у розподілі аеродинаміки та теплообміну по висоті труби, що визначають умови конденсації вологи всередині труби.
3. Вперше виявлено змінний характер зміни швидкості потоку, статичного тиску та тепловіддачі по висоті кормової частини одиночної труби, що зумовлено її конічною формою.
4. Розподіл тепловіддачі по висоті димової труби має складний характер і визначається її розташуванням на майданчику ТЕС. Використання рівняння (1) призводить до значної похибки під час розрахунку тепловіддачі на зовнішній поверхні димової труби.

Список використаної літератури:

1. Джигирей В. С., Сторожук В. М., Яцюк Р. А. Основи екології та охорона навколишнього природного середовища (Екологія та охорона природи). Львів: Афіша, 2000. 272 с.
2. Кошлак Г. В., Павленко А. М. Зменшення техногенного впливу вугільних ТЕС на довкілля (на прикладі Бурштинської ТЕС) // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористання, 2017, № 2 (16), С. 108 – 118.
3. Батальцев Є.В. Моделювання техногенного впливу на навколишнє природне середовище об’єктами теплоенергетики // дис. … канд. техн. наук. спец. 21.06.01, СумДУ, 2021. https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/83581/5/diss_Bataltsev.pdf
4. Манеев А.П., Низовцев М.И., Терехов В.И. Влияние ветра на фильтрацию газов через оболочку дымовых труб // Теплоэнергетика, 2013, № 4, С. 20—26. – Режим доступу: DOI:10.1134/S0040363613040061
5. Зменшення вологовмісту димових газів у конденсаційних теплоутилізаторах котельних установок / Н. М. Фіалко, Р. О. Навродська, С. І. Шевчук, Г. О. Гнєдаш, О. Ю. Глушак // Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна. – Режим доступу: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2019/29_8/23.pdf

6. Дымовые трубы: традиции и инновации: монография / В. М. Асташкин, В. С. Жолудов, А. З. Корсунский и др.; под ред. д-ра техн. наук, проф. В. М. Асташкина и канд. техн. наук А. З. Корсунского. – Челябинск: Издательский центр ЮурГУ, 2011. – 496 с.
7. Войцехівський О.В., Попов В.О., Дорохова Н.Д. Стійкість рівноваги висотних димових труб на фундаментах мілкого закладання // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2017. № 2,С. 42-49.
8. Обтікання кругового циліндра [електронний ресурс]. – Режим доступу: https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Civil_Engineering/Book%3A_Fluid_Mechanics_(Bar-Meir)/10%3A_Inviscid_Flow_or_Potential_Flow/10.3_Potential_Flow_Functions_Inventory/10.3.1%3A_Flow_Around_a_Circular_Cylinder
9. CylinderW. A. KhanJ. R. CulhamM. M. Yovanovich Fluid Flow Around and Heat TransferFrom an Infinite Circular / CylinderW. A. KhanJ. R. CulhamM. M. Microelectronics Heat Transfer Laboratory,Department of Mechanical Engineering,University of Waterloo,Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1, Journal of Heat Transfer, 2005, Vol. 127, P.785 – 790. – Режим доступу: https://www.academia.edu/3539412/Fluid_Flow_Around_and_Heat_Transfer_From_an_Infinite_Circular_Cylinder
10. Чиркова А. П. Аеродинаміка та теплообмін одиночної конічної труби при зовнішньому обтіканні / А. П. Чиркова, А. А. Халатов, В. С. Олійник, О. В. Шіхабутінова // Теплофізика та теплоенергетики. – 2021. – Т. 43, № 4. – С. 25–33. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2663-7235. – DOI: https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.3.
11. Теплові електростанції [електронний ресурс]. – Режим доступу: https://corelamps.com/zahalne/teplovi-elektrostantsii/
12. Манеев А. П., Терехов В. И. Аэродинамика и теплообмен дымовых труб. – АНО Издательский Дом «Научное обозрение», 2017. – 226 с.
13. Халатов А. А., Коваленко Г. В., Ільченко А. П., Олійник В. С., Шіхабутінова О. В. Вплив інфраструктури навколишньої поверхні на теплообмін і аеродинаміку конічної димової труби ТЕС // Тези доповідей Міжнародної науково-технічноїконференції «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування», Харків, 27–28 квітня 2021 р, НТУ «ХПІ» – С. 62-63. – Режим доступу: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/66979

References:

1. Dzhigirei V. S., Storozhuk V. M., Yatsyuk R. A. Basics of Ecology and Environmental Protection (Ecology and Nature Protection). Lviv: Afisha, 2000. 272 p.
2. Koshlak G. V., Pavlenko A. M. Reduction of technogenic impact of coal-fired TPPs on the environment (on the example of Burshtyn TPP) // Ecological safety and balanced resource use, 2017, No. 2 (16), P. 108 – 118.
3. Bataltsev E.V. Modeling of Man-Made Impact on the Surrounding Natural Environment by Thermal Power Facilities // thesis … candidate of engineering sciences, specialty 21.06.01, Sumy State University, 2021. https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/83581/5/diss_Bataltsev.pdf
4. Maneev A.P., Nyzovtsev M.I., Terekhov V.I. The Influence of Wind for Filtration of Gases Through the Shell of Smoke Pipes // Thermal Power Engineering, 2013, No. 4, P. 20—26. DOI:10.1134/S0040363613040061
5. Reducing the Moisture Content of Flue Gases in Condensing Heat Exchangers of Boiler Plants / N. M. Fialko, R. O. Navrodska, S. I. Shevchuk, G. O. Hnedash, O. Yu. Glushak

// Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2019/29_8/23.pdf
6. Chimneys: Traditions and Innovations: Monograph / V. M. Astashkin, V. S. Zholudov, A. Z. Korsunsky et al; editors: Dr. Engineering Sciences, prof. V. M. Astashkin and Ph.D in engineering sciences A. Z. Korsunsky – Chelyabinsk: Publishing Center of YuUR State University, 2011. – 496 p.
7. Voytsehivskyi O.V., Popov V.O., Dorokhova N.D. Equilibrium Stability of Tall Chimneys on Shallow Foundations // Modern Technologies, Materials and Structures in Construction. 2017, No. 2, p. 42-49.
8. Flow around a circular cylinder [electronic resource]. – Access mode:https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Civil_Engineering/Book%3A_Fluid_Mechanics_(Bar-Meir)/10%3A_Inviscid_Flow_or_Potential_Flow/10.3_Potential_Flow_Functions_Inventory/10.3.1%3A_Flow_Around_a_Circular_Cylinder
9. CylinderW. A. KhanJ. R. CulhamM. M. Yovanovich Fluid Flow Around and Heat TransferFrom an Infinite Circular / CylinderW. A. KhanJ. R. CulhamM. M. Microelectronics Heat Transfer Laboratory,Department of Mechanical Engineering,University of Waterloo,Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1, Journal of Heat Transfer, 2005, Vol. 127, P.785 – 790. – Access mode: https://www.academia.edu/3539412/Fluid_Flow_Around_and_Heat_Transfer_From_an_Infinite_Circular_Cylinder
10. Chyrkova A. P. Aerodynamics and Heat Exchange of Single Conical Pipe with External Flow / A. P. Chirkova, A. A. Khalatov, V. S. Oliynyk, O. V. Shikhabutinova // Thermal Physics and Thermal Energy. – 2021. – Vol. 43, No. 4. – P. 25–33. – Bibliography: 10 titles. – ISSN 2663-7235. DOI: https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.3
11. Thermal power plants [electronic resource]. – Access mode:https://corelamps.com/zahalne/teplovi-elektrostantsii/
12. Maneev A.P., Terekhov V.I. Aerodynamics and Heat Exchange of Chimneys. – Publishing House "Scientific Review", 2017. – 226 p.
13. Khalatov A. A., Kovalenko G. V., Ilchenko A. P., Oliynyk V. S., Shikhabutinova O. V. The Influence of Infrastructure of Surrounding Surface on Heat Exchange and Aerodynamics of Conical Chimney of the TPP // Abstracts of Reports of the International Scientific and Technical Conference "Energy and Heat Engineering Processes and Equipment", Kharkiv, April 27–28, 2021, NTU "KhPI" - pp. 62-63. – Access mode: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/66979

A. P. Chyrkova
PhD student
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine
ilcenkoanna777@gmail.com

PROBLEMS OF AERODYNAMICS AND HEAT EXCHANGE IN THE TRANSVERSE FLOW OF SINGLE CONICAL PIPE AT THE TPP SITE

Chimney of thermal power plants are an important element of the complex infrastructure of the TPP industrial site. However, insufficient attention is paid to chimney during calculations. In our country, the majority of chimneys are in an unsatisfactory condition, which leads to negative consequences for the ecological conditions of the environment and affects the operation of thermal power plants as a whole.

The paper presents the results of numerical modeling of aerodynamics and heat exchange

on the surface of a conical chimney located at the TPP site. The work uses the traditional RNG k-ε turbulence model for problems of this class. The uniform and height-variable wind speed profile determined by the infrastructure of the environment (different types of terrain) and the industrial site of the TPP are considered. The flow around the chimney has a complex character, with the formation of areas of separation flow and destruction of the boundary layer. It is shown that the location of the pipe relative to the infrastructure objects of the industrial site of the thermal power plant plays an important role in the distribution of velocity, static pressure, and heat exchange along the height of the pipe, which are periodic in height both with a uniform velocity profile and in the area above the engine room building with variable speed profiles of the oncoming air flow. It is shown that the use of the equation of two-dimensional flow around a round cylinder leads to a significant error when calculating the heat transfer on the outer surface of the conical smoke pipe. Such calculation results lead to inaccurate calculations and a reduction in the service life of smoke pipes of thermal power plants and destruction of their surface. Also, incorrect calculations of the heat transfer of the TPP smoke pipe will lead to condensation in its middle and also lead to cracks in the structure of the chimneys.

Keywords: chimney, aerodynamics, heat exchange, heat transfer coefficient, velocity profile, RNG *k-ε* turbulence model, ANSYS 2020-R1.

Одержано редакцією 14.09.2022
Прийнято до друку 18.10.2022