

*А. П. ЧИРКОВА, А. А. ХАЛАТОВ***ТЕПЛООБМІН ТА АЕРОДИНАМІКА БІЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ КОНІЧНОЇ ТРУБИ НА МАЙДАНЧИКУ ТЕС**

Розглянуто особливості теплообміну та аеродинаміки біля вертикальної конічної труби на майданчику ТЕС. Дослідження виконували в програмному пакеті ANSYS 2020-R1. У роботі застосовувався метод комп'ютерного моделювання 3D-моделі інфраструктури ТЕС. При комп'ютерному моделюванні використана RNG $k-\epsilon$ модель турбулентності. Проведені дослідження показують значний вплив розташування будівлі машинного залу на аеродинаміку димової труби та залежності від напрямку вітру.

Ключові слова: теплообмін, димова труба, інфраструктура ТЕС, машзал, напрям вітру, 3D-модель.

*A. CHYRKOVA, A. KHALATOV***HEAT EXCHANGE AND AERODYNAMICS OF THE VERTICAL CONICAL FUNNEL AT THE THERMAL POWER PLANT SITE**

The funnel is the most important element of the thermal power station. An appropriate arrangement of the system for the removal of the gaseous products of fuel combustion inside the funnel results in no moisture condensation and proper maintenance of the operation conditions of the funnel. To measure the temperature of combustion products along the funnel height we need to define the boundary conditions of the third kind for the external surface of the funnel. The studies showed that in the case of the uniform velocity profile, the heat exchange and aerodynamics on the surface of the single vertically arranged funnel have specific features conditioned by the funnel configuration and the contact of its base with the ground surface. In particular, the rear part of the funnel is characterized by a periodic change in the static pressure, velocity and the height heat loss coefficient. The purpose of this research was to define the average heat loss along the height of the conical funnel situated at the industrial site of the thermal power station for different wind vectors and velocities. To simulate the heat exchange and aerodynamics near the funnel situated at the thermal power plant site we used the infrastructure that includes the following elements: mechanical compartment, substation, administrative building, warehouse and two cooling towers. The network model of the hydro-power plant includes 1137782 units and 4741859 elements. A minimum orthogonal quality is 0.1 and a maximum biasing is 0.89. The \hat{g} RNG $k-\epsilon$ turbulence model, the Enhanced Wall Function and the Simplex algorithm were used for the velocity-pressure interrelation problem in steady flows. The air density is independent of the temperature at the computational volume inlet (the gravitation is neglected). The funnel surface temperature was specified as constant and equal to 100 °C. The heat exchange near the funnel was studied at different wind directions in the wind velocity range of 5 to 25 m/s. Hence, the wind direction, the environmental infrastructure and the industrial thermal power plant site have an essential effect on the funnel height heat exchange distribution pattern. Evidently, it is defined to a great extent by the funnel aerodynamics. A maximum heat loss level is observed when the flow is rushed to the backside of the building at the south-to-north wind direction and a minimum heat loss level is observed for the east-to-west and west-to-east wind directions for the parallel flow. A minimum heat loss is observed at a longitudinal wind motion along the mechanical compartment building in west-to-east and east-to-west directions. These specific features should be taken into account when designing tall funnels with an optimal change in the combustion product temperature along the funnel height. We can draw a conclusion that the specific features of the heat exchange in question should be obligatory taken into account when designing tall funnels. Keywords: heat exchange, funnel, thermal power plant infrastructure, mechanical compartment, wind direction and 3D model.

Key words: heat exchange, chimney, HPP infrastructure, mashzal, wind direction, 3D model.

Вступ

Димова труба є найважливішим елементом теплової електростанції (ТЕС). При правильній організації видалення газоподібних продуктів спалювання палива конденсація вологи всередині труби немає і технічний стан труби зберігається у працездатному стані [1]. Для визначення температури продуктів згоряння по висоті труби важливо знати граничні умови третього роду (коефіцієнти тепловіддачі) на зовнішній поверхні димової труби, при цьому в тепловому розрахунку використовується, як правило, середній коефіцієнт тепловіддачі, що визначається інфраструктурою ТЕС, напрямом та швидкістю вітру.

Дослідження, виконані в роботі [2], показали, що при рівномірному профілі швидкості теплообмін та аеродинаміка на поверхні одиночної вертикально розташованої конічної труби мають специфічні особливості, зумовлені формою труби та контактом її основи із землею поверхнею. Зокрема, у кормовій частині труби спостерігається пере-

одична зміна статичного тиску, швидкості та коефіцієнта тепловіддачі за висотою. Середня по висоті труби тепловіддача залежить від типу навколишньої поверхні (A , B або C) і профілю швидкості [2], при цьому вона може бути як більшою і меншою за середню тепловіддачу для рівномірного профілю швидкості. Якщо конічна димова труба розташовується на промисловому майданчику ТЕС, то розподіл тепловіддачі по її висоті залежить також і від інфраструктури майданчика, що має враховуватися у практичних розрахунках. Нині детальні дані цих умов практично відсутні.

Мета роботи

Мета справжньої роботи – визначення середньої тепловіддачі по висоті конічної димової труби, розташованої на промисловому майданчику ТЕС при різного напрямку та швидкості вітру. Дослідження виконано методом комп'ютерного моделювання з чисельним розв'язком диференціальних рівнянь руху, енергії та нерозривності.

© А. П. Чиркова, А. А. Халатов, 2022

Виклад основного матеріалу

Сучасні ТЕС – це складні технічні підприємства, вартість яких складає мільярди доларів. При компонованні ТЕС розуміється взаємне розміщення основних та допоміжних споруд на її майданчику. Компоновання ТЕС – це один з найбільш складних питань проектування, при цьому доводиться враховувати велику кількість внутрішніх та зовнішніх факторів, таких як, рельєф місцевості, розташування водосховищ, троянда вітрів та ін. Звичайно на промисловому майданчику ТЕС розташовані головний корпус; мазутне та оливне господарства; корпус подрібнення палива; будівлі підсобних виробництв; пікова водогрійна котельня, градирні; газо регулюючий пункт, очисні споруди стічних вод, насосні станції циркуляційного, протипожежного та питного водопостачання, та інші об'єкти [3]–[6].

Для моделювання теплообміну та аеродинаміки біля димової труби, розташованої на території ТЕС, використано інфраструктуру, що включає такі елементи: машинний зал, підстанцію, адміністративну будівлю, склад та дві градирні (рис. 1). Висота окремих елементів показано на рис. 1 у дужках, ширина та довжина – на рис. 2.

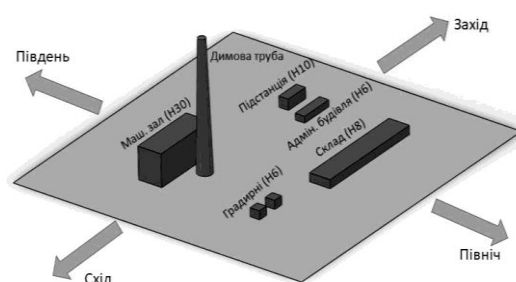


Рис. 1 – Інфраструктура теплової електростанції (загальний вигляд)

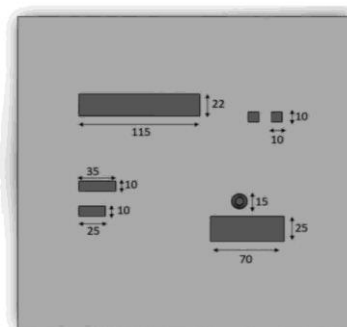
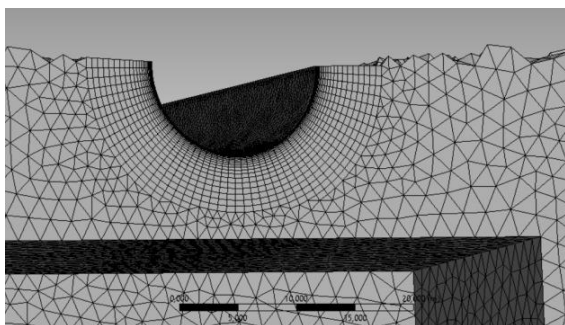
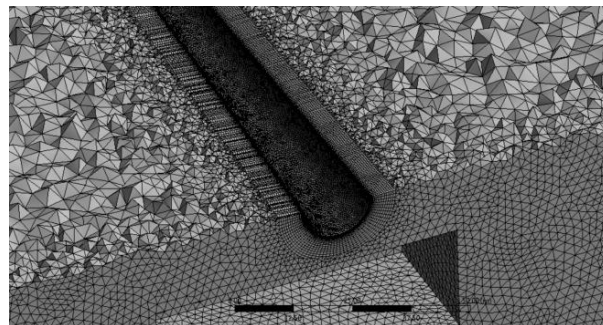


Рис. 2 – Інфраструктура теплової електростанції (вид зверху)



а



б

Рис. 3 – Сіткова модель інфраструктури ТЕС: а, б – види на сіткову модель навколо димової труби

Сіткова модель інфраструктури ТЕС (рис. 3) включає 1137781 вузлів та 4741859 елементів. Мінімальна ортогональна якість – 0,1, максимальний перекис – 0,89. Чутливість сітки розглянуто у роботі [2]. У розрахунках використовувалася RNG k - ϵ модель турбулентності [2], пристінна функція *Enhanced Wall Function*, алгоритм розв'язку для з'єднання швидкісного тиску в стійких потоках *Simplex*. Густина повітря не залежна від температури на вході в розрахунковий об'єм (силами тяжіння знехтувано). Температура поверхні труби задавалася постійною та рівною 100 °С.

Тепловіддача біля вертикальної конічної труби

Теплообмін біля димової труби вивчався за різних напрямків вітру в діапазоні швидкості вітру

w_0 від 5 до 25 м/с. Швидкість вітру w_z на межах майданчика ТЕС задавалася степеневим рівнянням

$$w_z = w_0 k(z), \quad (1)$$

де $k(z) = 0,4(z/10)^{0,5}$,

яке відповідає профілю швидкості на поверхні типу С (міські райони з щільною забудовою будинками заввишки більше 25 м) [2], w_0 – середня швидкість вітру на границі майданчика.

Розподіл середнього по кутовій координаті труби коефіцієнта тепловіддачі наводиться на рис. 4. Дані, наведені на рис. 4а, б, практично ідентичні, оскільки аеродинаміка обтікання димової труби практично однакова. На більшій частині труби, включаючи область машинного залу (висота 30 м), зміна коефіцієнта тепловіддачі по висоті труби приблизно на 20 % нижче за дані, отримані з рівняння [1, 2] для поперечного обтікання цилінд-

ра постійного поперечного перерізу потоком із рівномірним профілем швидкості. Поблизу земної поверхні (z знаходиться в межах від 12 м до 15 м) середня тепловіддача вище за значення, отримані з рівняння (2), що зумовлено умовами обтікання труби біля земної поверхні.

$$\alpha_0 = 7,3 w_z^{0,66}. \quad (2)$$

У разі набігання потоку на трубу, що стоїть перед будинком (рис. 4а), по всій висоті труби середня тепловіддача нижче даних, отриманих за рівнянням (2), що обумовлено гальмуванням потоку будинком машзала та його перерозподілом. У разі напрямку потоку з півдня на північ (рис. 4г) до висоти труби $z = 50$ м (у межах будівлі машзала і вище) середня тепловіддача вище за дані за рівнянням (2), але надалі вона на 8 %–10 % нижче результатів, отриманих за цим рівнянням.

Отже, напрямку вітру, інфраструктура навколишнього простору і промислового майданчика ТЕС значно впливають на характер розподілу тепловіддачі по висоті труби. Очевидно, це значною мірою визначається особливостями аеродинаміки обтікання димової труби. Найбільший рівень тепловіддачі спостерігається при набіганні потоку на зворотну сторону будівлі машинного зала у напрямку вітру з півдня на північ, а найменша – при напрямку вітру зі схід-захід і захід-схід при паралельному обтіканні машинного зала.

На рис. 5 представлені результати розрахунку середньої по кутовій координаті тепловіддачі для спрямування південь-північ при швидкості вітру

на межі промислового майданчика 12 м/с та 25 м/с. Зі збільшенням швидкості вітру середня тепловіддача в області $z < 50$ –60 м (вище будівлі машинного зала) значно вище даних, отриманих за рівнянням (2), а при $z > 50$ –60 м середня тепловіддача нижче даних, що відповідають рівнянню (2) або приблизно відповідають їм.

Особливості аеродинаміки біля вертикальної конічної труби

Аеродинаміка обтікання димової труби, яка перебуває в умовах промайданчика ТЕС, має специфічну структуру. Нижче розглянуто особливості аеродинаміки повітряного потоку біля димової конічної труби за двома напрямками вітру – з північі на південь та з півдня на північ.

Як і при обтіканні одиночної конічної труби в безкінечному просторі в кормовій частині труби зберігається періодична зміна швидкості (а також тиску та тепловіддачі) по висоті труби (рис. 6). В обох випадках за будівлею машзала утворюється вихровий слід унаслідок обтікання машзала, який значно впливає на тепловіддачу. За рахунок несиметричного розташування димової труби щодо будівлі машзала та впливу інфраструктури інших елементів промайданчика ТЕС обтікання димової труби також має несиметричний характер (рис. 7). В цьому випадку вихрова структура потоку визначає високий рівень тепловіддачі в області висоти труби менше 60 м.

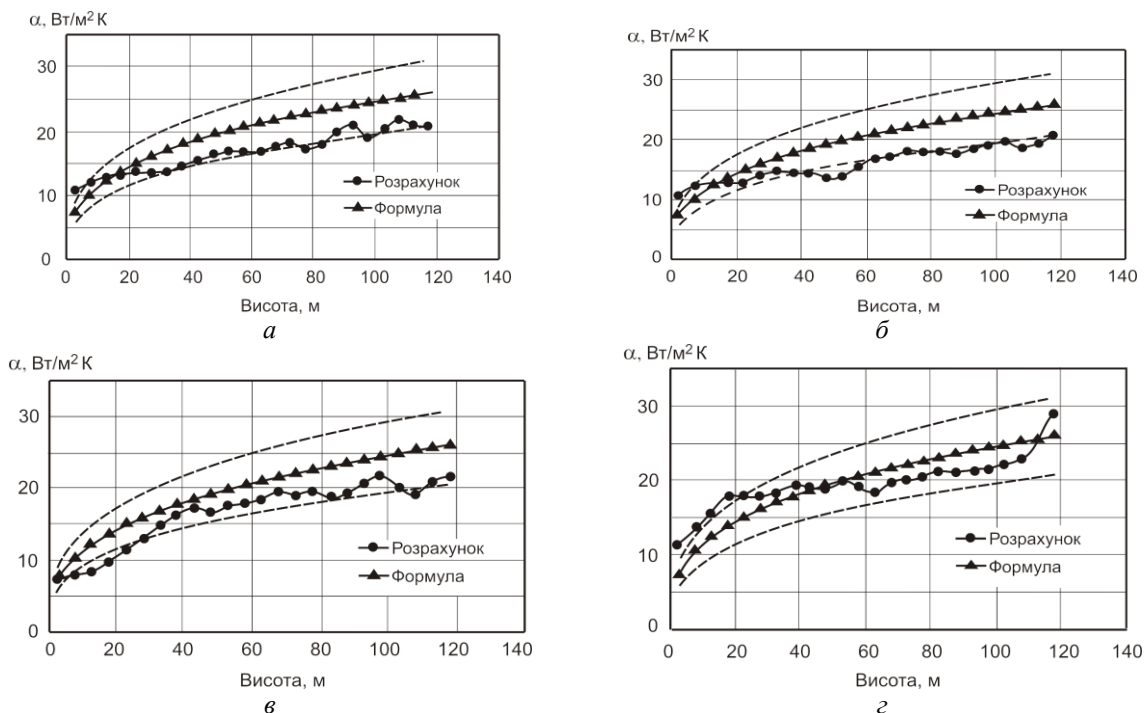


Рис. 4 – Середній по кутовій координаті коефіцієнт тепловіддачі: зміна по висоті димової труби ($w_0 = 5$ м/с): пунктирна лінія – відхилення $\pm 20\%$ від формули $\alpha_0 = 7,3 w_z^{0,66}$: а – напрям вітру зі сходу на захід; б – з заходу на схід; в – з півночі на південь; г – з півдня на північ

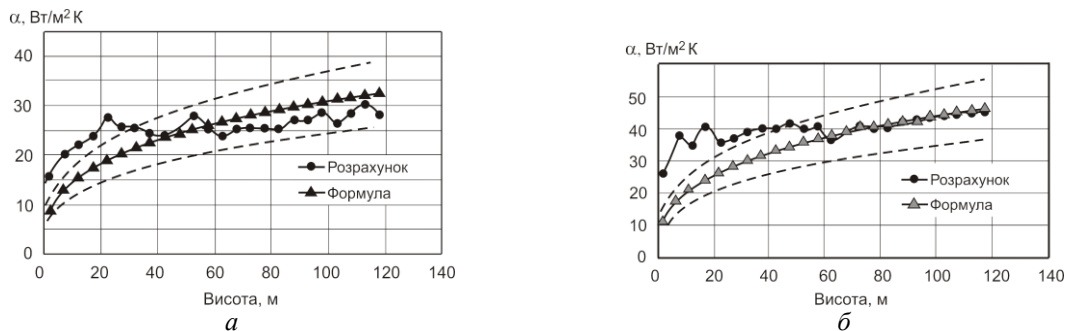


Рис. 5 – Середній по кутовій координаті коефіцієнт тепловіддачі: розподіл по висоті димової труби. Напрямок вітру: *a* – південь – північ; *б* – $w_0 = 12$ м/с і 25 м/с. Пунктирна лінія: відхилення $\pm 20\%$ від формули (2)

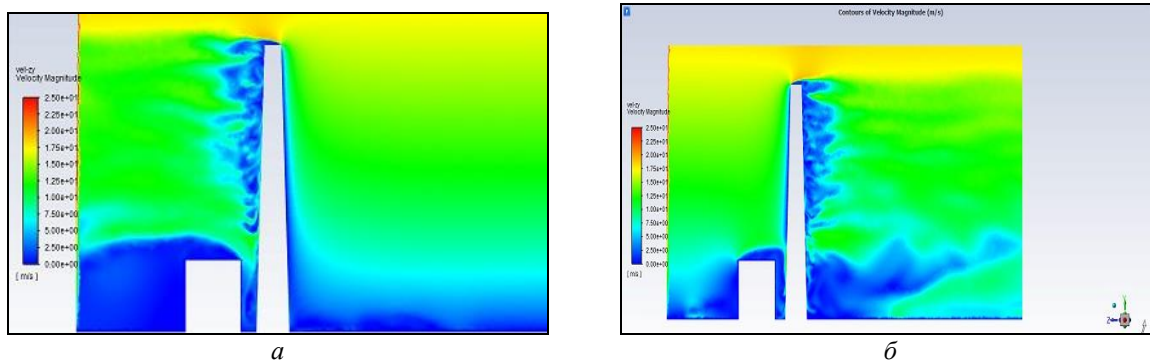


Рис. 6 – Поздовжнє зображення обтікання системи димова труба-машзал. Швидкість вітру 12 м/с: *a* – напрям вітру північ-південь; *б* – південь – північ

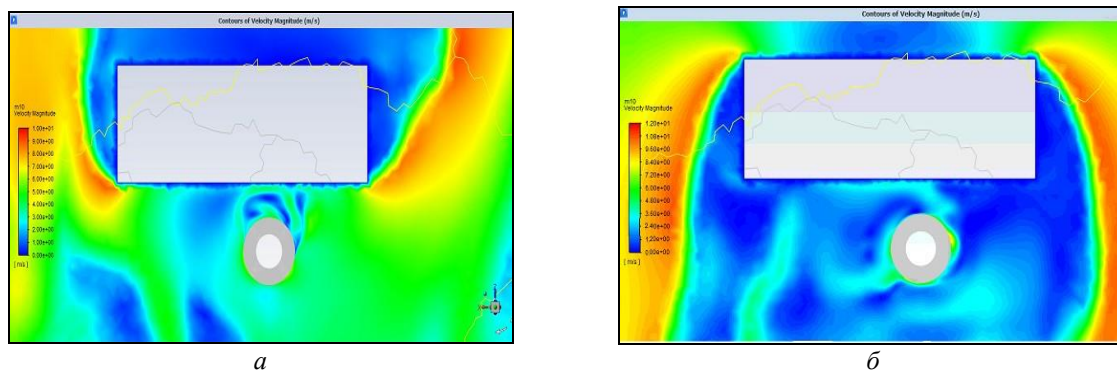
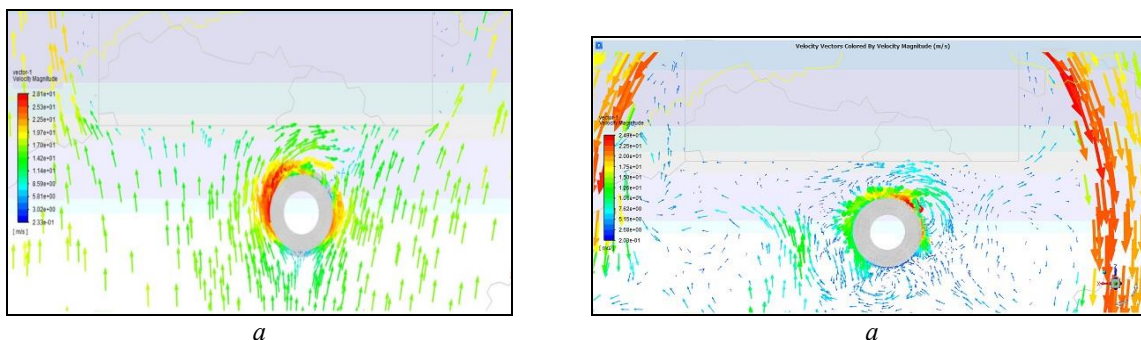
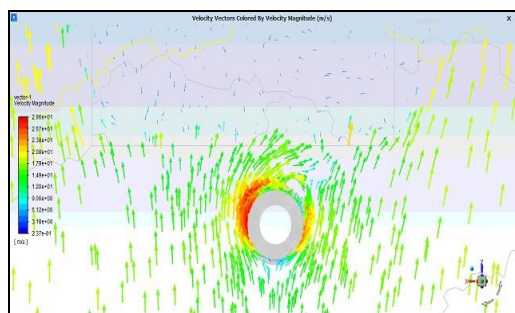
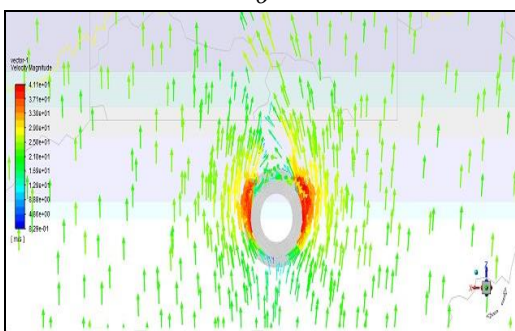


Рис. 7 – Поперечне обтікання системи димова труба-машзал. Поперечний перетин, висота 10 м. Швидкість вітру 12 м/с: *a* – напрямку вітру північ-південь; *б* – південь – північ



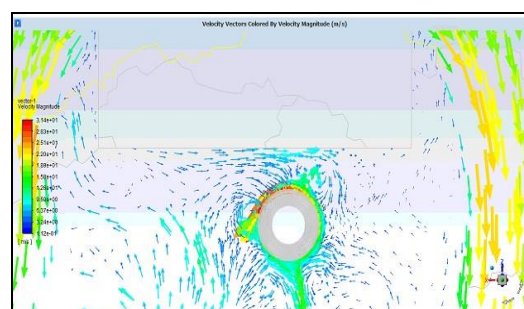


б

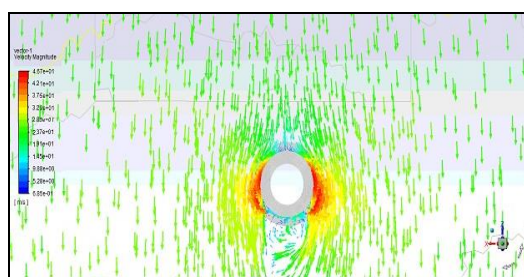


в

Рис. 8 – Поперечне обтікання димової труби на різній висоті від землі. Напрямок вітру: північ – південь. Швидкість вітру 25 м/с: а – відстань від поверхні 10 м; б – 20 м; в – 50 м



б



в

Рис. 9 – Поперечне обтікання димової труби на різній висоті від землі. Напрямок вітру: південь – північ. Швидкість вітру 25 м/с: а – висота перерізу 10 м; б – 20 м; в – 50 м

При набіганні потоку на трубу, що стоїть перед будинком (напрямок з північі на південь) структура потоку також несиметрична з більш високою швидкістю на лівій половині труби. При цьому за трубою більша частина потоку закручується вправо і рухається в області між кормовою частиною труби і стінкою машзала, формуючи складну структуру вихрову потоку з несиметричною областю відриву потоку за нею. Вище будівлі машзала обтікання труби поступово стає симетричним (рис. 8в), зі структурою близькою до обтікання круглої труби в безкінечному просторі та відривом потоку в області $\varphi \sim 140^\circ$.

При напрямку вітру з півдня на північ будівля машзала є природною перешкодою, потік, що набігає, огинає будівлю машзала (рис. 9а, б) і формує складну вихрову структуру потоку за ним з приблизно постійною швидкістю біля поверхні труби. Структура вихрового потоку змінюється за висотою труби в області машзала, що зберігається складною з локальними вихровими зонами. Вище будівлі машзала обтікання труби практично симетрично (рис. 9в), як і у разі напрямку вітру з півночі на південь.

Порівняння розглянутих вище двох варіантів показує, що у разі напрямку з півдня на північ внаслідок відривних зон прикордонний шар на поверхні труби в області машзала практично відсутня, що при відносно невисокій швидкості потоку сприяє високій тепловіддачі (рис. 5). При набіганні

потоку на трубу (напрямок вітру північ-південь), незважаючи на високу швидкість потоку тепловіддача по висоті труби в області машзала порівняно низька (рис. 4).

Таким чином, інфраструктура майданчика ТЕС значно впливає на аеродинаміку потоку і тепловіддачу біля поверхні димової труби. Найбільш високий рівень тепловіддачі досягається при напрямку вітру з півдня на північ, коли на поверхні труби формуються інтенсивні зони вихрового руху потоку за відсутності прикордонного шару. Найменша тепловіддача спостерігається при подовжньому русі вітру вздовж будівлі машзала у напрямках схід-захід та захід-схід.

Зазначені особливості слід враховувати під час проектування високих димових труб з оптимальною зміною температури продуктів згоряння за висотою димової труби. Використання рівняння (2) розрахунку зовнішньої тепловіддачі може призводити до похибки розрахунку 20 % і більше.

Висновки

1 Виконано теоретичне дослідження теплообміну та аеродинаміки конічної димової труби ТЕС з урахуванням інфраструктури навколишнього простору (профіль швидкості на межі проммайданчика) та інфраструктури ТЕС.

2 Будівля машзала проммайданчика значно впливає на аеродинаміку обтікання димової труби

і розподіл теплообміну по її висоті. Найбільша тепловіддача за рахунок формування інтенсивного руху вихрового потоку і руйнування прикордонного шару на поверхні труби спостерігається при русі вітру з півдня на північ.

З Вище будівлі машзалу зміна поздовжньої швидкості потоку (а також тиску та тепловіддачі) по висоті димової труби має періодичний характер.

4 Вище будівлі машзалу на певній висоті аеродинаміка обтікання труби практично відповідає обтіканню круглої труби в безкінечному просторі.

Розглянуті особливості теплообміну повинні обов'язково враховуватись при проектуванні високих димових труб ТЕС.

Список літератури

1. Манеев А. П. Аэродинамика и теплообмен дымовых труб : моногр. / А. П. Манеев, В. И. Терехов. – Москва : Научное обозрение, 2017. – 226 с. – ISBN 978-5-9909641-8-1.
2. 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/tpe.4.2021.3>.
3. СН 441-72* Вказівки щодо проектування огорожень майданчиків та ділянок [електронний ресурс]. – URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/7-1-0-24> (дата звернення 01.12.2020).
4. ДБН 360-92** Порівняльна таблиця проекту ДБН «планування і забудова територій» та чинні з будівельних норм [електронний ресурс]. – URL: http://dipromisto.gov.ua/files/NMD/PorivnTabl_DBN.pdf (дата звернення 01.12.2020).
5. ВНТП 81 (ВСН 29-81) Технологічного проектування теплових електричних станцій [електронний ресурс]. – URL: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=6764 (дата звернення 01.12.2020).

6. ВСН 6-75. СН 6-75. Інструкція з проектування виробництва газоподібних та зріджених продуктів поділу повітря (41666) [електронний ресурс]. – URL: https://dnaop.com/html/41666/doc%D0%92%D0%A1%D0%9D_6-75 (дата звернення 01.12.2020).

References (transliterated)

1. Maneev A. P., Terekhov V. I. (2017), *Ajerodinamika i teploobmen dymovyh trub* [Aerodynamics and heat exchange of chimneys], Nauchnoe obozrenie [Scientific Review], Moscow, 226 p.
2. Chyrkova A. P., Khalatov A. A. and Oliyik V. S., Shikhabutina O. V. (2021), “Аеродинаміка та теплообмін одиночної конічної труби при зовнішньому обтіканні [Aerodynamics and Heat Exchange of Single End Tube During External Flow]”, *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, vol. 43, no. 4, pp. 25–31, ISSN 2663-7235, <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2021.3>.
3. СН 441-72* *Vkazivky shhodo proektuvannya ogorodzen' mайданчикiv ta diljanok* [Instructions for the design of fences of sites and plots], Access mode: <https://dbn.co.ua/load/normativy/7-1-0-24> (accessed 01 December 2020).
4. ДБН 360-92** *Porivnjal'na tablycja proektu DBN «planuvannya i zabudova terytorij» ta chynny z budivельnih norm* [Comparative table of the project of the “Planning and Development of Territories” and current building regulations] [electronic resource] http://dipromisto.gov.ua/files/NMD/PorivnTabl_DBN.pdf (accessed 01 December 2020).
5. ВНТП 81 (ВСН 29-81) *Tehnologichnogo proektuvannya teplovyh elektrichnyh stancij* [Technological design of thermal power stations] [electronic resource] http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=6764 (accessed 01 December 2020).
6. ВСН 6-75. СН 6-75. *Instrukcija z proektuvannya vyrobnyctva gazopodibnyh ta zridzhenykh produktiv podilu povitrya* [Instructions for designing the production of gaseous and liquid air separation products (41666)] [electronic resource] https://dnaop.com/html/41666/doc%D0%92%D0%A1%D0%9D_6-75 (accessed 01 December 2020).

Надійшла (received) 30.04.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Чиркова Анна Петрівна (Chyrkova Anna) – аспірант, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ; тел.: (067) 504–82–92; e-mail: ilcenkoanna777@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0592-0845>.

Халатов Артем Артемович (Khalatov Artem) – доктор технічних наук, професор, академік НАН України, Інститут технічної теплофізики НАН України, завідувач відділом високотемпературної термогазодинаміки; Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», завідувач кафедри фізики енергетичних систем; м. Київ, Україна; e-mail: artem.khalatov1942@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7659-4234>.