

УДК 536.24; 621.184.5

АЕРОДИНАМІКА ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ ПОБЛИЗУ КОНІЧНОЇ ДИМОВОЇ ТРУБИ НА МАЙДАНЧИКУ ТЕПЛОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Чиркова А. П.^{1,2} аспірант, **Шіхабутінова О.В.²**, к.т.н., старший науковий співробітник

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

² Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2А, Київ, 03057

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

Розглянуті особливості аеродинаміки повітряного потоку при обтіканні одиночної конічної труби, розташованої на промисловому майданчику ТЕС при різному напрямку вітру. Дослідження виконано методом комп'ютерного моделювання. Вперше виявлено періодичний характер зміни швидкості та статичного тиску по висоті труби в кормовій області вище будівлі машинного залу. Визначено, що інфраструктура майданчика ТЕС істотно впливає на аеродинаміку повітряного потоку біля конічної димової труби, а рівняння подібності з використанням середньої тепловіддачі може давати великі похибки при розрахунку зовнішнього теплообміну.

The peculiarities of the aerodynamics of the air flow when flowing around a single conical pipe located on the industrial site of the TPP with different wind directions are considered. The research was carried out by the method of computer simulation. For the first time, the periodic nature of the change in speed and static pressure along the height of the pipe in the aft area above the engine room building was revealed. It was determined that the infrastructure of the TPP site significantly affects the aerodynamics of the air flow near the conical chimney, and the similarity equation using the average heat transfer can give large errors when calculating the external heat exchange.

Бібл. 3, рис. 10, табл. 1.

Ключові слова: конічна труба, аеродинаміка, майданчик ТЕС, напрям вітру.

D, d – діаметр, м;

$k(z)$ – коефіцієнт;

w – швидкість, м/с;

t – температура, °С;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²К).

Нижні індекси:

0 – середнє значення;

z – значення по висоті.

Вступ

Димова труба в комплексі інфраструктури теплової електростанції (ТЕС) відіграє важливу роль. Вона забезпечує виведення газоподібних продуктів згорання в атмосферу. При правильній організації виходу газів не відбувається конденсація вологи в середині труби і технічний стан труби зберігається у працездатному стані протягом більшого терміну [1]. При аналізі умов експлуатації та визначенні температури продуктів згорання всередині труби необхідно знати граничні умови третього роду (коефіцієнти тепловіддачі) на зовнішній поверхні димової труби. Для цього використовується середня тепловіддача у відповідності з емпіричним рівнянням подібності [2].

Зовнішнє обтікання димової труби має складний характер з вихровою структурою в кормовій частині. Профіль швидкості вітру перед конічною трубою визначається типом навколишньої поверхні

(А,В або С) [2]. Для міських районів з щільною забудовою будинками заввишки більше 25 м в розрахунках найчастіше використовується тип поверхні С. Дослідження, виконані в роботі [2], показали, що навіть при рівномірному профілі швидкості потоку, який набігає на трубу, аеродинаміка та теплообмін на поверхні одиночної вертикально розташованої конічної труби мають специфічні особливості, зумовлені формою труби та контактом її основи із землею поверхнею. Зокрема, у кормовій частині вперше спостерігалася періодична зміна по висоті труби статичного тиску, швидкості та коефіцієнта тепловіддачі [2]. Якщо димова труба розташована на промисловому майданчику ТЕС, то аеродинаміка обтікання димової труби залежить також і від інфраструктури майданчика.

Мета роботи – визначення особливостей аеродинаміки повітряного потоку при обтіканні одиночної конічної труби, розташованої на промис-

ловому майданчику ТЕС при різному напрямку вітру. Дослідження виконано методом комп'ютерного моделювання з чисельним розв'язком диференціальних рівнянь руху та нерозривності.

Інфраструктура ТЕС

Сучасні ТЕС – складні технічні підприємства. При компонуванні ТЕС враховується взаємне розташування основних та допоміжних споруд на її майданчику, рельєф місцевості, розташування водосховищ, роза вітрів та ін. Зазвичай на промисловому майданчику ТЕС розташовані головний корпус; мазутне та мастильне господарства; корпус подрібнення палива; будівлі підсобних виробництв; пікова водогрійна котельня; градирні; газорегулюючий пункт; очисні споруди стічних вод; насосні станції циркуляційного, протипожежного та питного водопостачання та інші об'єкти [3].

Для моделювання аеродинаміки біля димової труби, розташованої на території ТЕС, в роботі використано спрощену інфраструктуру майданчика, що включає основні елементи - машинний зал (висота 30 м), підстанцію, адміністративну будівлю, склад та дві градирні (рис. 1). Розмір майданчика ТЕС з півдня

на північ – 295 м, зі сходу до заходу – 247 м. Димова труба має діаметр в основі $D = 15$ м і конусність 0.0625 (в усті діаметр $d = 7.5$ м), висота труби – 120 м. Димова труба розміщується несиметрично щодо будівлі машинного залу. Висота окремих елементів показана на рис. 1 у дужках, а ширина та довжина – на рис. 2.

Сіткова модель інфраструктури ТЕС 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 залежить від температури на вході в розрахунковий об'єм (силами тяжіння було знехтувано). Температура поверхні труби задавалася постійною та дорівнювалася 100 °С.

Програма дослідження

У роботі вивчено три напрямки вітру, що наведені в таблиці 1. Розглянуто два сезони експлуатації ТЕС (осінь, зима) з різною температурою повітря та напрямком вітру. Швидкість вітру становила 5 м/с.

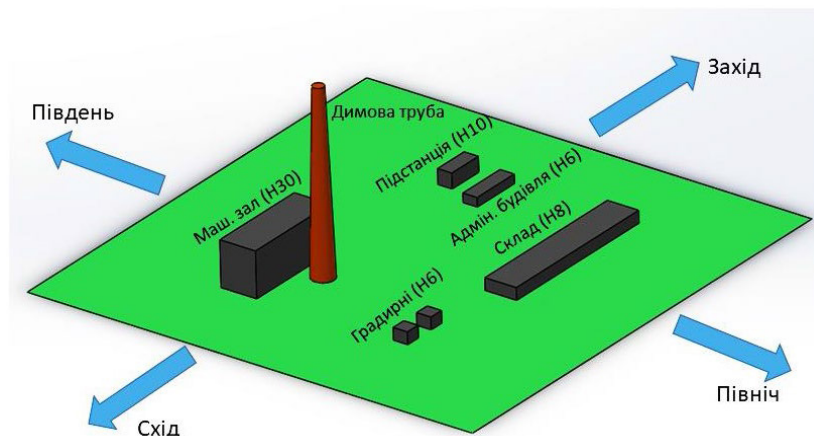


Рис. 1. Інфраструктура теплової електростанції (загальний вигляд)

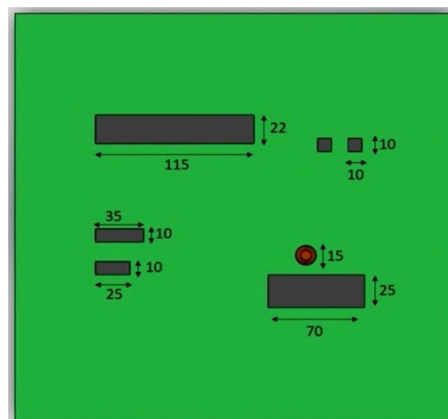


Рис. 2. Інфраструктура теплової електростанції (вид зверху)

Профіль швидкості на межі майданчика ТЕС визначався відповідно до міського типу інфраструктури оточуючого простору навколо майданчика ТЕС (тип С). Профіль швидкості вітру для цих умов задавався рівнянням

$$w_z = w_0 k(z),$$

де w_z – швидкість потоку на висоті z від поверхні землі, w_0 – швидкість вітру на границі майданчика, коефіцієнт $k(z)$ визначається за залежністю $k(z) = 0,4 (z/10)^{0.5}$.

Таблиця 1. Вхідні данні для розрахунку

Варіант	Середня швидкість повітря w_0 , м/с	Температура t , °C	Напрямок повітря	Сезон
Варіант 1	5	10	Східний	осінь
Варіант 2	5	-5	Північний	зима
Варіант 3	5	-5	Південний	зима

Варіант 1. Східний напрямок вітру

Цей варіант розглядає східний (зі сходу на захід) напрямок вітру (рис. 3,4) в осінній проміжок часу. В цьому випадку обтіканні будівлі машинного залу та димової труби відбувається без будь-яких перешкод перед ними з вузькою зоною прискореного потоку між машинним залом та трубою. Із рис. 3 а, б випливає, що обтікання машинного залу несиметричне, причому за машинним залом формується широка несиметрична відривна зона.

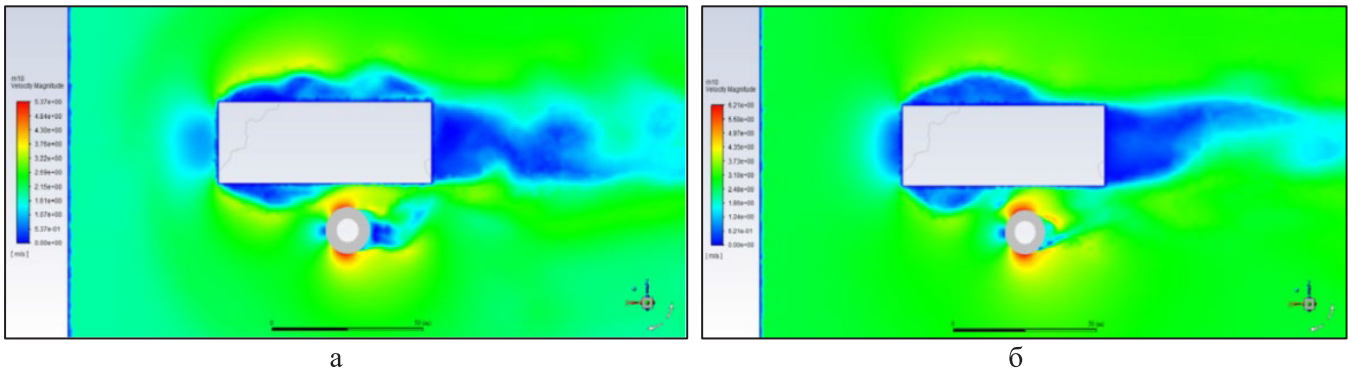


Рис. 3. Поле швидкості вітру біля димової труби та машинного залу при східному напрямку вітру (поперечний розріз на різній висоті): а – висота 10 м; б – висота 20 м

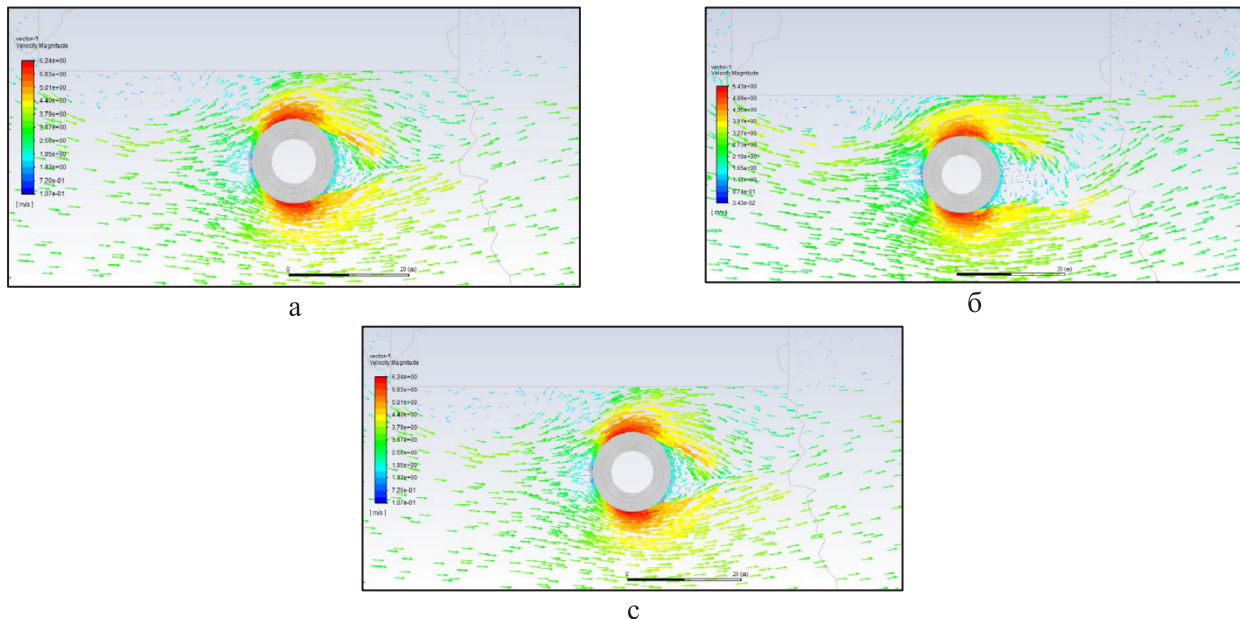


Рис. 4. Аеродинаміка димової труби при східному напрямку вітру на різній висоті: а – 10 м; б – 20 м; в – 80 м

Будівля машинного залу не істотно впливає на характер обтікання димової труби. Як в області машинного залу (рис. 4 а, б) так і вище нього (рис. 4 в) характер обтікання приблизно симетричний, причому положення точки відриву потоку на поверхні труби з правого та лівого боку (біля 140°) свідчить про турбулентний характер її обтікання. Можна відзначити різну довжину відривної зони за димарем (рис. 4). В даному випадку можна очікувати невисокий рівень тепловіддачі від труби до набігаючого потоку.

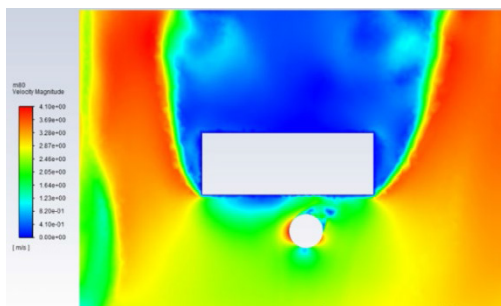


Рис. 5. Обтікання системи димова труба-машинний зал, вид зверху, Північний напрямок вітру, висота перерізу 29 м

Варіант 2. Північний напрямок вітру

На рис. 5 відображено поле швидкості при обтіканні машинного залу з димовою трубою, що розташована несиметрично. За димовою трубою розташований машинний зал висотою 30 м і шириною 70 м, який є перешкодою для потоку, що обтікає трубу. Як видно з рисунка, обтікання будівлі машинного залу несиметричне, воно має характер обтікання поганообтічного тіла, з відривом потоку на бічних поверхнях і даху машинного

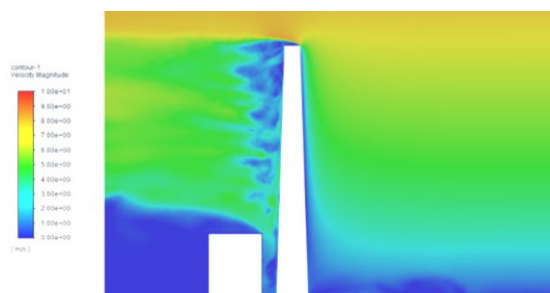
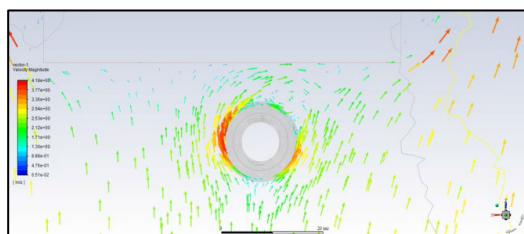
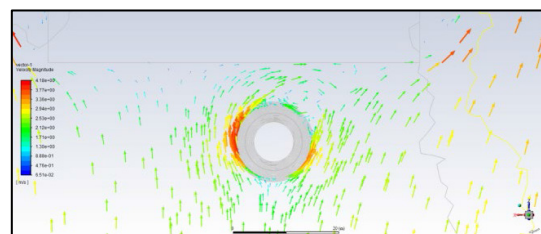


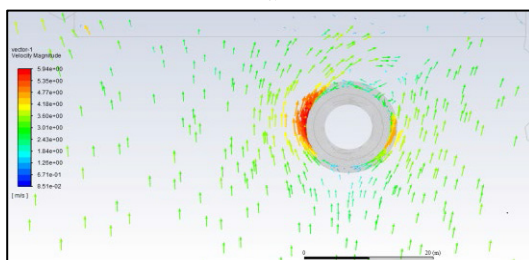
Рис. 6. Обтікання системи димова труба – машинний зал, вид збоку. Північний напрямок вітру



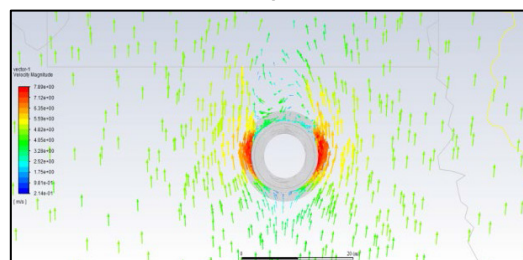
а



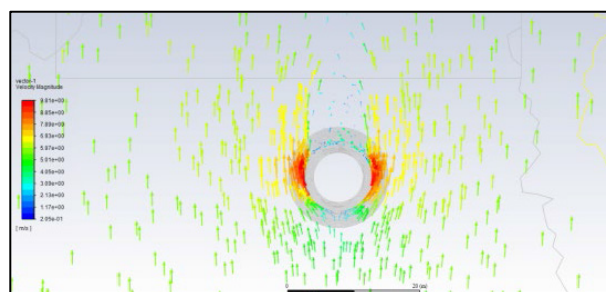
б



в



г



д

Рис. 7. Аеродинаміка димової труби при північному напрямку вітру на різній висоті:

а – 20 м; б – 29 м; в – 31 м; г – 50 м; д – 80 м

залу. Аналіз аеродинаміки обтікання труби збоку (рис.6) вище будівлі машинного залу показує періодичний характер розподілу швидкості потоку (і статичного тиску) по висоті труби, так само як і при обтіканні одиночної труби [2]. Періодичність розподілу поля швидкості та тиску призводить до нерівномірного розподілу тепловіддачі по висоті труби.

Для детального аналізу впливу машинного залу і вихорів, що формуються за трубою, на рис. 7 наведено векторне поле швидкості на висоті від 20 м до 80 м від поверхні землі. До висоти 31 м (рис. 7 а, б, в) обтікання конічної труби є суттєво несиметричним, що обумовлено несиметричним розташуванням труби відносно машинного залу. Вихрова структура за трубою зміщена вправо, а сам вихор коротший і має більш цілісний і однонаправлений характер (за годинниковою стрілкою). З правого боку труби можна відзначити відсутність примежового шару на її поверхні. Така структура зберігається і на висоті 31 м (рис. 7 в), що вище машинного залу. Однак істотно вище за будівлю машинного залу (рис. 7 г, д) структура потоку за трубою практично симетрична, гомогенна вихрова структура потоку розбивається на

кілька менших за розмірами, але різнонаправлених вихорів. У цьому випадку слід очікувати досить низьким теплообміном між трубою та набігаючим потоком.

Варіант 3. Південний напрямок вітру

Цей варіант розглядає зворотний до варіанту 2 напрям вітру (з півдня на північ) за тих же граничних умов. У цьому випадку будівля машинного залу розташовується перед димовою трубою висотою, що створює природну перешкоду набігаючому потоку і «затіннює» частину труби будинком. Потік набігаючого вітру огинає будівлю зліва, справа та зверху з відривом потоку і зниженою швидкістю за будівлею машинного залу (близько 0.5 м/с). За будівлею машинного залу потік несиметричний (рис. 8), що зумовлено несиметричним розташуванням димової труби щодо будівлі машинного залу та впливом інфраструктури ТЕС (склад, рис.1).

На рис. 9 приводиться аеродинаміка обтікання машинного залу та димової труби з бічної сторони. Аналіз показує, що так само як і при північному напрямку вітру по висоті труби вище за будівлю машинного залу спостерігаються періодичні коливання швидкості (і статичного тиску) в кормовій області, причому гирло труби обтікається з високою швидкістю.

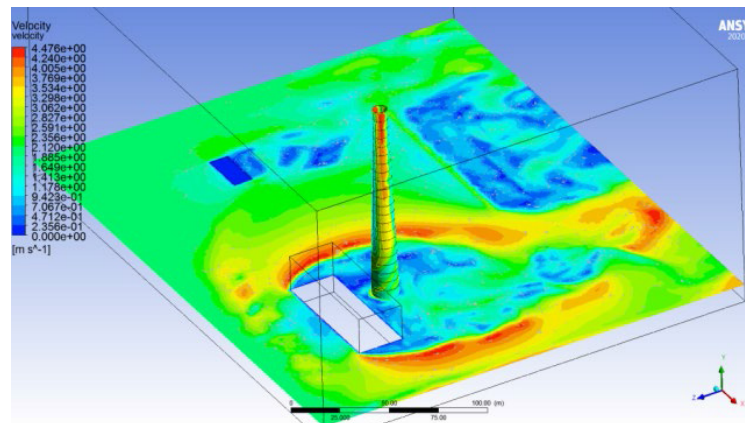


Рис. 8. Аеродинаміка майданчика ТЕС, південний напрямок вітру, висота перерізу 10 м

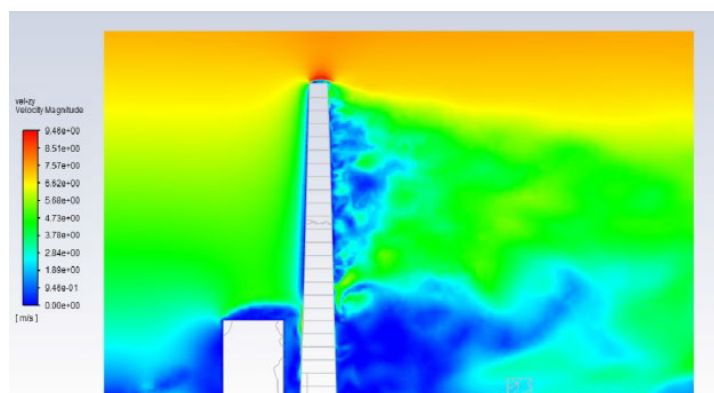


Рис. 9. Обтікання системи димова труба – машинний зал, вид збоку, південний напрямок вітру

На рис. 10 розглянуто аеродинаміку обтікання димової труби на різній висоті від земної поверхні при південному напрямку вітру. На висоті від 10 м до 29 м обтікання труби відбувається із малою швидкістю. При цьому на структуру потоку значний вплив має відрив потоку на бічних поверхнях будівлі машинного залу та частково на його даху. На висоті 29 і 31 м (в області даху машинного залу) на поверхні труби формується слабка зона підвищеної швидкості, а починаючи з висоти 50 м формуватися симетрична структура обтікання труби з різною довжиною хвоста (рис. 10 д, е). У зоні за «затіненням» димової труби машинним залом (рис. 10 а, б, в, г) її обтікання має нерегулярний і вих-

ровий характер із формуванням слідів обтікання будівлі машинного залу. Примежовий шар на поверхні труби практично відсутній, але на висоті понад 31 м обтікання труби має досить симетричний характер. Тому на висоті труби менше 31 м слід очікувати досить високу тепловіддачу.

Висновки

1. Інфраструктура майданчика ТЕС істотно впливає на аеродинаміку повітряного потоку біля конічної димової труби.

2. Вперше виявлено періодичний характер зміни швидкості та статичного тиску по висоті труби в кормовій області вище будівлі машинного залу.

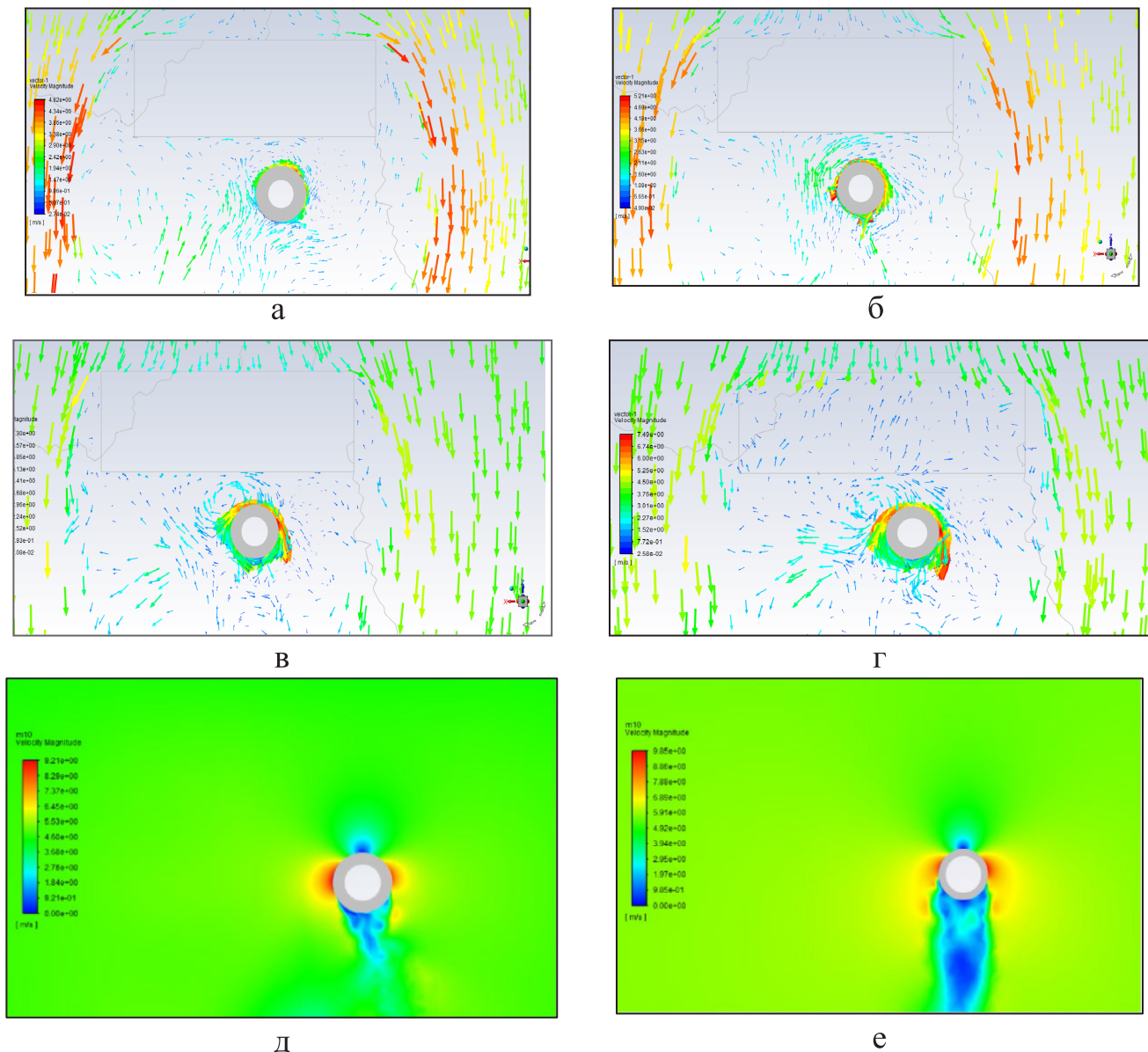


Рис. 10. Аеродинаміка димової труби при південному напрямку вітру на різній висоті:

а – 10 м; б – 20 м; в – 29 м; г – 31 м; д – 50 м; е – 80 м

3. При південному напрямі вітру на поверхні труби в області машинного залу формується складна вихрова структура за відсутності примежового шару на поверхні труби. В останньому випадку слід очікувати найвищої тепловіддачі від поверхні труби до набігаючого потоку.

4. У зв'язку із складною аеродинамікою для труби в умовах інфраструктури майданчика ТЕС рівняння подібності для середньої тепловіддачі [2] може давати великі похибки при розрахунку зовнішнього теплообміну.

ЛІТЕРАТУРА

1. Манеев А.П., Терехов В.И. Аэродинамика и теплообмен дымовых труб. – АНО Издательский Дом «Научное обозрение», 2017. – 226 с.
2. Чиркова А.П., Халатов А.А., Олійник В.С., Шіхабутінова О.В. Аеродинаміка та теплообмін одиночної конічної труби при зовнішньому обтіканні, стаття, Теплофізика та теплоенергетики 43(4), с. 25-31, 2021.
3. Теплові електростанції. Норми проектування. Галузеві будівельні норми [електронний ресурс] // <https://tovlk.com.ua/zakonodatelstvo-4/>

AERODYNAMICS OF THE AIR FLOW NEAR THE CONICAL CHIMNEY PIPE ON THE TERRITORY OF THE THERMAL POWER PLANT

Chyrkova A. P.¹, Shikhabutinova O.V.²

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine

²Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2-A Maria Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine

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

The chimney at the industrial site of the TPP ensures the release of gaseous combustion products into the atmosphere. With the correct organization of the gas outlet, moisture condensation does not occur in the middle of the pipe and the technical condition of the pipe remains in working order for a longer period of time. When analyzing the operating conditions and determining the temperature of the combustion products inside the pipe, it is necessary to know the boundary conditions of the third kind (heat transfer coefficients) on the outer surface of the chimney. The external flow around the smoke pipe has a complex character with a vortex structure in the aft part. The wind speed profile in front of the conical pipe is determined by the type of surrounding surface near the TPP. Studies have shown that even with a uniform velocity profile of the flow impinging on the pipe, the aerodynamics and heat exchange on the surface of a single vertically located conical pipe have specific features due to the shape of the pipe and the contact of its base with the earth's surface.

Purpose. The purpose of the work is to determine the characteristics of the aerodynamics of the air flow when flowing around a single conical pipe located on the industrial site of the TPP with different wind directions. The research was carried out by the method of computer modeling with the numerical solution of the differential equations of motion and continuity.

Materials and methods. To simulate the aerodynamics near the chimney located on the territory of the TPP, the simplified infrastructure of the site was used in the work, which includes the main elements - a machine room (height 30 m), a substation, an administrative building, a warehouse and two cooling towers. The size of the TPP site from south to north is 295 m, from east to west - 247 m. The smoke pipe

has a diameter at the base $D = 15$ m and a taper of 0.0625 (at the mouth diameter $d = 7.5$ m), the height of the pipe is 120 m. Smoke pipe is placed asymmetrically in relation to the engine room building.

Three wind directions were studied in the work. Two seasons of TPP operation (autumn, winter) with different air temperature and wind direction are considered. The wind speed was 5 m/s. The speed profile at the boundary of the TPP site was determined according to the urban infrastructure type of the surrounding space around the TPP site. The wind speed profile for these conditions was given by the equation

$$w_z = w_0 k(z),$$

де w_z – flow velocity at height z from the surface of the earth, w_0 – wind speed at the border of the TPP territory, coefficient $k(z)$ is determined by dependence $k(z) = 0.4 (z/10)^{0.5}$.

Results. In the first variant (the wind blows from the east) during the autumn period, a slight influence of the engine room building on the aerodynamics and heat transfer of the chimney was observed (the chimney is in front of the engine room building).

If the wind direction is south (option 2), the flow has the character of a poorly streamlined body, with flow separation on the side surfaces and the roof of the engine room. Analysis of the aerodynamics of the flow around the pipe on the side above the engine room building shows the periodic nature of the distribution of flow velocity (and static pressure) along the height of the pipe, just as in the case of flow around a single pipe. In this case, a fairly low heat exchange between the pipe and the oncoming flow should be expected.

Option 3 is similar to option 2. The aerodynamics of the flow around the engine room and smoke pipe from the side are given. The analysis shows that, just as with the northerly direction of the wind, periodic fluctuations of the speed (and static pressure) are observed in the aft area at the height of the pipe above the engine room building, and the mouth of the pipe flows at a high speed.

Conclusions. The infrastructure of the TPP area significantly affects the aerodynamics of the air flow near the conical chimney. For the first time, the periodic nature of the change in speed and static pressure along the height of the pipe in the aft area above the engine room building was revealed. When the wind direction is south, a complex vortex structure is formed on the surface of the pipe in the area of the engine room in the absence of a boundary layer on the surface of the pipe. In the latter case, the highest heat transfer from the pipe surface to the oncoming flow should

be expected. Due to the complex aerodynamics for the pipe in the conditions of the infrastructure of the territory of the TPP, the similarity equation for the average heat transfer can give large errors when calculating the external heat exchange.

References 3, figures 10, tables 1.

Keywords: conical tube, aerodynamics, TPP territory, wind direction.

1. *Maneev A.P., Terekhov V.I.* Aerodynamics and heat exchange of chimneys. – ANO Publishing House "Scientific Review", 2017. – 226 p.

2. *Chyrkova A.P., Khalatov A.A., Oliynyk V.S., Shikhabutinova O.V.* Aerodynamics and heat exchange of a single conical pipe with external flow, article, *Thermal Physics and Thermal Energy* 43(4), p. 25-31, 2021.

3. *Thermal power plants.* Design standards. Industry building standards [electronic resource] // <https://tovlk.com.ua/zakonodatelstvo-4/>

Отримано 14.09.2022

Received 14.09.2022