

УДК 536.24+621.184.5

DOI 10.36910/775.24153966.2023.76.31

А. П. Чиркова

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

МЕТОДИКА ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІКИ І ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ ОБТІКАННІ КРУГЛОГО ЦИЛІНДРА

У роботі розглянуто зовнішню аеродинаміку та теплообмін одиночного круглого циліндра при поперечному перерізі. Проаналізовано вплив початкових та граничних умов, вплив навколишньої інфраструктури на характер та швидкість набігаючого потоку. Оскільки димова труба теплової електростанції має незначну конусність, дане дослідження можна розглядати як перше наближення до дослідження зовнішньої аеродинаміки та теплообміну одиночної вертикальної димової труби ТЕС.

Ключові слова: круглий циліндр, аеродинаміка, теплообмін, димова труба, набігаючий потік, дискретизація.

A. Chyrkova

METHOD OF NUMERICAL MODELING OF AERODYNAMICS AND HEAT EXCHANGE IN TRANSVERSE FLOW OVER A ROUND CYLINDER

The paper considers the external aerodynamics and heat exchange of a single round cylinder with a cross section. The influence of the initial and boundary conditions, the influence of the surrounding infrastructure on the nature and speed of the oncoming flow is analyzed. Since the chimney of a thermal power plant has a slight taper, this study can be considered as a first approach to the study of the external aerodynamics and heat transfer of a single vertical chimney of a TPP.

Keywords: round cylinder, aerodynamics, heat exchange, chimney, oncoming flow, discretization.

Вступ. Енергетика України в наш час має важливе значення для забезпечення реалізації багатьох технічних, виробничих та споживчих процесів. Важливу ланку в енергетиці займає теплова енергетика, що забезпечується тепловими електростанціями. За даними, наведеними в [1], на початок 2022 року теплові електростанції забезпечували 29,3% від загальної структури енергетики України. Особливо відчутним значення теплових електростанцій стало під час обстрілів країною – агресором. Теплові електростанції (ТЕС) представляють собою складний механізм в роботі якого в цілому залежить від технічного стану кожного з її елементів. Проте, нажаль більшість з ТЕС на території нашої держави знаходяться в незадовільному стані.

Димова труба є одним із важливих елементів ТЕС. За її допомогою здійснюється вивід в атмосферу продуктів горіння палива. В наш час більшість димових труб ТЕС України працюють в не розрахункових умовах без уточнення навантаження станції (повна, часткова), виду спалюваного палива, зовнішніх граничних умов, що призводить к випадку хімічного конденсату всередині труби, що сприяє її руйнуванню та викиду шкідливих речовин в атмосферу. За таких умов питання дослідження зовнішньої аеродинаміки та теплообміну димових труб теплових електростанцій має важливе значення для досягнення кращих показників та продовження задовільного стану димових труб в цілому. Проте, в цьому напрямку в наш час майже відсутні фундаментальні і практичні дослідження.

Обґрунтування числового методу. При зовнішній аеродинаміці та теплообміні димової труби спостерігається ламінарні та турбулентні типи потоку, що набігає на неї, відривом потоку позаду труби, впливом інфраструктури навколишнього та інфраструктури ТЕС. Експериментальні дослідження вимагають великих фінансових внесків та займатимуть великий проміжок часу, тому для проведення дослідження доцільно використовувати метод комп'ютерного моделювання з числовим розв'язком системи диференціальних рівнянь збереження енергії та імпульсу разом з граничними умовами. Проаналізовано декілька програмних пакетів, що дозволяють реалізувати такі фізичні процеси (SpaceClaim Engineer, Autodesk AutoCAD, SolidWorks, ANSYS) та обрано ліцензійну версію ANSYS 2020-R1, яка часто використовується для проведення такого роду досліджень [2]. Суть числового методу полягає в дискретизації області розрахунку, що буде досліджуватися та перетворенні системи диференціальних рівнянь в систему лінійних алгебраїчних рівнянь за числом вузлів обчислювальної сітки.

Мета. Метою даної статті є дослідження зовнішньої аеродинаміки та теплообміну одиночного круглого вертикального циліндра, як першого наближення до вертикальної димової труби теплової електростанції.

Геометрична модель, рівняння та граничні умови. Враховуючи невелику конусність димової труби в першому наближенні для вибору то обґрунтування параметрів сіткової моделі можливий розгляд поперечного обтікання круглого безкінечного циліндра в області великих значень чисел Рейнольдса ($Re > 1\,000\,000$), що характерні для димових труб ТЕС.

Геометрична модель області розрахунків представлена у вигляді паралелепіпеда з наступними геометричними параметрами: ширина – 20 000 мм, довжина – 120 000 мм, висота – 40 000 мм. В даній області розміщено одиночний круглий циліндр, що показано на рисунку 1. Циліндр знаходився від початку розрахункової області на відстані від лівого краю 29774 мм та з правого краю – 28525 мм. Відносно ширини досліджуваної області циліндр знаходився по середині. Циліндр було розділено на 40 секцій по висоті (1 секція – 1 м), кожна з яких визначає локальні периметри потоку та труби.

За умови великих значень чисел Рейнольдса область ламінарного потоку, за умови набігання потоку з переду циліндра, достатньо мала, тому нижче розглянемо турбулентний режим, для якого система визначальних рівнянь включає в себе наступні рівняння:

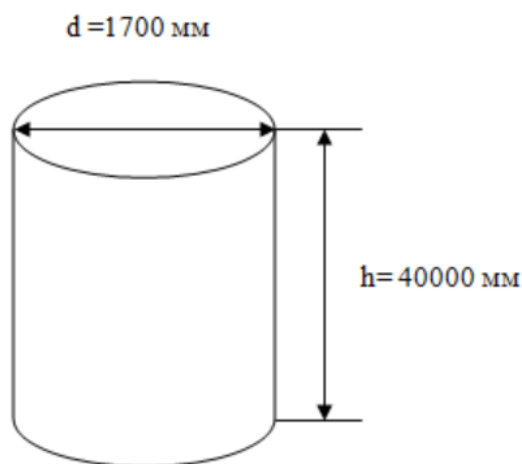


Рис. 1. Геометрична модель вертикального круглого циліндра

1. Рівняння збереження енергії:

$$\frac{\partial(\rho h_t)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho h_t)}{\partial x_i} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \tau_{ij} + \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}), \quad (1)$$

2. Рівняння збереження імпульсу

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

3. Рівняння нерозривності

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (3)$$

4. Рівняння стану

$$p = \rho RT, \quad (4)$$

При проведенні дослідження важливе значення мають правильно задані початкові умови. Тобто для стаціонарного випадку необхідно задати геометричні (описано вище), фізичні та граничні умови однозначності. Важливими також є значення швидкості та температури потоку на межах досліджуваної області. Важливе значення має навколишня інфраструктура, що знаходиться поряд з досліджуваною областю. Певні перешкоди впливатимуть на швидкість повітря, що набігає на циліндр. Швидкість набігаючого потоку описується наступним рівнянням [3]:

$$w_z = w_0 \cdot k(z), \quad (5)$$

В рівнянні (5): w_z – швидкість потоку на висоті z від поверхні Землі; w_0 – середня швидкість набігаючого потоку (вітру); $k(z)$ – коефіцієнт, що враховує зміну швидкості вітру з висотою z . В свою чергу величина $k(z)$ розраховується за формулою:

$$k(z) = k_{10} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha, \quad (6)$$

В формулі (6) k_{10} і α залежать від типу навколишнього інфраструктури середовища [3].

Дискретизація області розрахунку, метод розв'язку алгебраїчних рівнянь. У дослідженні використано метод дискретизації розрахункової за методом контрольних об'ємів. Такий метод застосовується при розрахунках в програмному пакеті ANSYS 2020-R1. При застосуванні методу контрольних об'ємів область що визначається розбивається на тетраедри, які повинні перекривати всю досліджувану область. Контрольний об'єм представляє собою грань тетраедра, що має межі тільки з одним сусіднім контрольним об'ємом [4]. Отримані контрольні об'єми – це рівняння збереження енергії (енергії, кількості руху, маси) для кожного вузла сітки [5] На рисунку 2 показано розрахункову сітку, на яку було розбито досліджувану область після дискретизації. При використанні ANSYS 2020-R1 для розв'язування задач комп'ютерної гідродинаміки використовується пакет Fluent, що дозволяє використовувати різні методи розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь, що буде отримано після дискретизації.

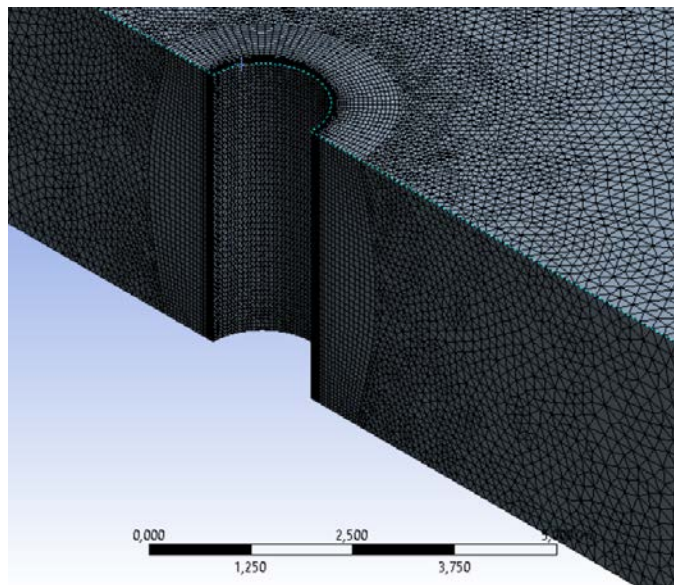


Рис. 2. Розрахункова сітка досліджуваної області.

Критерії порівняння, результати аналізу. При виборі сіткової моделі основними критеріями для вибору варіанту, який найкраще підходить для розрахунку поперечного обтікання циліндра були: кількість вузлів, параметри, що впливають на відстань від вузла до стінки циліндра, розмір елементів сітки. На поверхні труби задано граничні умови першого роду.

З проведеного варіювання параметрів [6] було помічено, що при відстані між першим вузлом та стінкою циліндра та досліджуваної області більше 8 мм починає з'являтися нестабільність отриманих результатів (більше 20%) та середнього значення коефіцієнта тепловіддачі розрахованих за формулою [3], що широко застосовується в практичних розрахунках.

$$\alpha_0 = 7.3 \cdot w_x^{0.66}, \quad (7)$$

Отже після аналізу варіантів сітки, що описано в роботі [6], було обрано варіант з наступними параметрами: відстань від першого вузла до стінки циліндра та досліджуваної області становила 8 мм, приріст (Growth rate) – 1.1.

Висновки. В роботі в якості першого наближення комп'ютерної моделі використано круглий циліндр, розташований вертикально на поверхні землі. Дослідження зовнішньої аеродинаміки та теплообміну виконані числовим методом розв'язання системи диференціальних рівнянь за допомогою програмного пакету ANSYS 2020-R1. В методиці розрахунку враховуються особливості розподілу швидкості вітру по висоті труби, обумовлені впливом інфраструктури навколишнього простору. В результаті аналізу вибрано варіант сітка з відстань від першого вузла до стінки циліндра та досліджуваної області становила 8 мм та приростом 1.1. Отримані результати було використано при розрахунку зовнішньої аеродинаміки і теплообміну конічної димової труби [6].

Список використаних джерел

1. Особливості вітчизняного виробництва електроенергії. [електронний ресурс].
Доступно: <https://www.ueex.com.ua/presscenter/news/osoblivosti-vitchiznyanogo-virobnitstva-elektroenergii/>
2. Д. О. Малахова, «Моделі та методи комп'ютерної підтримки рішень в інформаційних системах підготовки вантажних операцій на танкерах», дис....ст. док. філос.: 004.514, Державний університет "Одеська політехніка", Одеса, 2020, 179 с.
3. А. П. Манеев и В. И. Терехов, *Аэродинамика и теплообмен дымовых труб*. М.: АНО Издательский Дом «Научное обозрение», 2017, 226 с.
4. 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.
5. С.В. Патанкар, *Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости* / Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.
6. 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 теплоенергетики* 43(4), с. 25-31, 2021.
<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.3>