УДК: 536.24; 621.184.5

АЕРОДИНАМІКА ТА ТЕПЛООБМІН ОДИНОЧНОЇ КОНІЧНОЇ ТРУБИ ПРИ ЗОВНІШНЬОМУ ОБТІКАННІ

Чиркова А. П.^{1,2}, аспірант, Халатов А.А.^{1,2}, академік НАН України, Олійник В.С.², аспірант, Шіхабутінова О.В.², к.т.н.

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

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

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

Розглянуті особливості зовнішньої аеродинаміки та теплообміну одиночної вертикальної конічної труби, встановленої на земній поверхні. Дослідження виконано методом комп'ютерного моделювання, 3D модель труби реалізовано в середовищі ANSYS 2020-R1, при моделюванні використано RNG k-ε модель турбулентності. При рівномірному профілі набігаючого повітряного потоку в кормовій частині труби виявлено періодична зміна статичного тиску і тепловіддачі по висоті труби. Розглянуто вплив інфраструктури навколишнього простору на зовнішню аеродинаміку і теплообмін одиночної конічної димової труби.

Рассмотрены особенности внешней аэродинамики и теплообмена одиночной вертикальной конической трубы, установленной на земной поверхности. Исследование выполнено методом компьютерного моделирования, 3D модель трубы реализована в среде ANSYS 2020-R1, при моделировании использована RNG k-ε модель турбулентности. При равномерном профиле набегающего воздушного потока в кормовой части трубы обнаружено периодическое изменение статического давления и теплоотдачи по высоте трубы. Рассмотрено влияние инфраструктуры окружающего пространства на внешнюю аэродинамику и теплообмен одиночной конической дымовой трубы.

The features of external aerodynamics and heat transfer of a single vertical conical tube installed on the earth surface are considered. The study was carried out by the method of computer simulation, the 3D model of the pipe was implemented in the ANSYS 2020-R1 environment, and the RNG k-ε turbulence model application. With a uniform profile of the incoming air flow in the aft part of the pipe, a periodic change in static pressure and heat transfer along the height of the pipe was found. The influence of the infrastructure of the surrounding space on the external aerodynamics and heat transfer of a single conical chimney is considered.

Бібл. 10, рис. 11, табл. 3.

Ключові слова: конусна труба, ANSYS2020-R1, 3D модель, параметри сітки, типи місцевості.

d – діаметр, м;

h – відстань першого вузла від стінки, мм;

$k(z)$ – коефіцієнт;

w – швидкість, м/с;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²К).

Нижні індекси:

0 – середнє значення;

z – значення по висоті.

Вступ

Безпека сучасних ТЕС суттєво залежить від надійної роботи всього комплексу основного та допоміжного обладнання, тому на діючих об'єктах теплової енергетики України відбувається періодична його заміна чи модернізація [1,2]. Якщо для заміни суттєво капіталомістких котлоагрегатів або турбогенераторів знаходяться технічні та економічні обґрунтування, то димовим трубам не приділяється така увага. Їх продовжують експлуатувати, підтримуючи технічний стан поточними та капітальними ремонтами, хоча у значній частині димових труб вже вироблений передбачений термін експлуатації в 50 років [3]. Це призводить до того, що в даний час більшість димових труб працюють з параметрами, на які вони не були спроектовані.

Відомо, що модернізація котлів та систем газоочистки, істотне зниження навантажень на окремих ТЕС, а також перехід котлів на інший вид палива, найчастіше супроводжуються зниженням температур відхідних газів [1]. Хоча це не критично для конструкції ствола димових труб, але тільки до умови, коли вміст вологи димових газів збільшується. Зниження температури газів всередині труби і підвищення температури точки роси являється суттєвою проблемою, що позначається на технічному стані димових труб [2].

Важливою особливістю зовнішнього обтікання димових труб являються великі числа Рейнольдса $Re = wd/\nu$, які сягають 10^6 та більше. У літературі існує обмежене число робіт, в яких наведені результати дослідження особливостей поперечного обтікання циліндра в потоці

повітря при таких високих числах Рейнольдса [4-6]. В тепловому розрахунку, як правило, визначається тільки середній коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні труби у відповідності з рівнянням [7]:

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

При цьому в розрахунках не враховуються особливості аеродинаміки та локального теплообміну, обумовлені конусністю труби. Це дає недостатньо надійні дані для визначення перепаду температур по товщині труби, місця випадку конденсату в середині труби та вибору типу антикорозійного захисту труби. На умови обтікання димової труби, як споруди, великий вплив надає інфраструктура навколишнього середовища [8]. При розрахунках цей факт практично не враховується.

Ціль

Робота присвячена дослідженню аеродинаміки та теплообміну при обтіканні повітрям одиночної димової труби конічної форми. При дослідженні використаний метод комп'ютерного моделювання з чисельним інтеграцією рівнянь руху і енергії. На першому етапі розглянута одиночна труба з рівномірним профілем набігаючого потоку. Надалі, вивчено вплив інфраструктури навколишнього простору на аеродинаміку та теплообмін одиночної конічної труби.

Геометрична та комп'ютерна моделі

Для розрахунку використана одиночна вертикальна труба конічної форми висотою 40 м, діаметром в основі 1.7 м і в усті – 0.85 м. Комп'ютерна модель розрахована у програмі ANSYS2020-R1. Модель розроблена в однорідній області, де за середовище взято повітря. Вид 3D моделі представлений на рис. 1.

Рис. 1. 3D модель області дослідження

Чутливість сітки

Для отримання достовірних результатів проведено дослідження по отриманню оптимального варіанту параметрів сітки для умов тепловіддачі. При аналізі використано зовнішнє обтікання циліндричної труби.

Були досліджені сітки з параметрами, які впливають на відстань першого вузла від стінки циліндра від 0.02 до 12 мм і швидкість збільшення розмірів елементів по мірі віддалення від області інтересу (Growth rate GR), див. таблиця 1, варіанти 1, 2. Критерієм вибору сітки були стабільність розрахунку, найменша кількість вузлів при прийнятному відхиленні (до 20%) коефіцієнта тепловіддачі від середнього коефіцієнта для циліндричної труби за емпіричною залежністю (1).

Для аналізу чутливості та перевірки сітки обрано варіант циліндричної труби з незмінним діаметром 1.7 м. В якості граничних умов використовувалися граничні умови першого роду (температура поверхні труби).

Розрахункова модель розроблена в однорідній області, а за середовище було взято повітря.

В якості моделі турбулентності обрана традиційна для задач даного класу *RNG k-ε* модель, пристінна функція Enhanced Wall Function, алгоритм розв'язку для з'єднання швидкісного тиску в стійких потоках Simplex. Результати аналізу чутливості сітки наведені в таблиці 1.

На рисунку 2 показано залежність співвідношення середнього коефіцієнта тепловіддачі α_0 , розрахованого чисельним методом та за формулою (1) для варіантів 1 та 2, див. табл. 1. Розглянуто вплив відстані від першого вузла до стінки, при різних швидкостях набігаючого потоку від 5 до 25 м/с.

Визначено, що при відстані першого вузла від стінки циліндра та області, яка нас цікавить (Growth rate

Рис. 2. 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.

Таблиця 1. Аналіз чутливості сітки та верифікація

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

GR), більше 8 мм починає з'являтися нестабільність і відхилення отриманих даних від значень середнього коефіцієнту тепловіддачі за формулою (1) більше ніж 20%. В результаті аналізу вибрано область з параметрами сіточної моделі, що відповідають варіанту 2d таблиці 1: GR = 1,1; h = 8мм.

Зображення загального виду на сітку варіанту 2d та області інтересу (пристінний шар) наведено на рис. 3.

Результати досліджень та їх аналіз

При дослідженні аеродинаміки і теплообміну конусна труба умовно поділено на 40 секції (Zone) Одна секція має висоту 1 м. Розглянуто випадок рівномірної швидкості потоку перед трубою.

На рис. 4 проілюстровано поле швидкості (4,а) і температури (4,б) потоку на повздовжньому перерізі труби. Як впливає з рисунка, ці поля відрізняються періодично по висоті труби.

В табл. 2 і на рис. 5 наведено зміна коефіцієнтів тепловіддачі для кожної з 40 секцій конічної труби. Zone (0-1) заходиться в основі труби, а Zone (39-40) –

відповідно в усті. Як видно з рисунку, максимальне значення коефіцієнта тепловіддачі знаходиться в Zone (21-22). Періодична зміна коефіцієнта тепловіддачі по висоті труби та зокрема в Zone (21-22) показана на рис. 6.

Щоб пояснити розподіл коефіцієнтів тепловіддачі, на рис. 7 наведено вектори швидкості руху повітря при поперечному обтіканні конічної труби. За конус-

Рис. 3. Види на варіант сітки 2d.

Рис. 4. Поле швидкості (а) та температури (б) при обтіканні конічної труби.

Швидкість потоку 25 м/с

Рис. 5. Коефіцієнти тепловіддачі для кожної з 40 секцій конічної труби. Швидкість потоку 25 м/с

Рис. 6. Коефіцієнти тепловіддачі на поверхні труби та Zone(21-22) зокрема.

Швидкість потоку 25 м/с

ною трубою виникають періодичні зони циркуляції, які відповідають за теплообмін за «точкою відриву». Інтенсивність циркуляції в таких зонах можна охарактеризувати від застійної – коли потік рухається переважно вздовж циліндру, слабо перемішуючись, до зворотної – коли за певною секцією утворюється зворотній потік та активне перемішування потоку. Зміна статичного тиску по висоті труби також має періодичний характер

(рис. 8). Зони зниженого тиску, одна з таких відповідає зоні труби Zone (21-22), характеризується найбільш високим коефіцієнтом тепловіддачі.

Аналіз показав, що при швидкості набігаючого потоку 25 м/с, середній коефіцієнт тепловіддачі конусної труби складає 62.5 Вт/м²К, а за формулою (1) – 61.1 Вт/м²К. Це свідчить про малий вплив конусності на середню тепловіддачу всієї труби. Результати, представлені на

Таблиця 2. Коефіцієнт тепловіддачі для 40 секцій (Zone) труби

Секція	α (Вт/м ² К)	Секція	α (Вт/м ² К)
Zone0-1	64.54522	Zone20-21	67.58335
Zone1-2	68.69423	zone21-22	70.2919
Zone2-3	63.84821	zone22-23	65.56638
Zone3-4	63.40478	zone23-24	57.66368
Zone4-5	57.33098	zone24-25	58.12565
Zone5-6	64.24637	zone25-26	62.07988
Zone6-7	61.3349	zone26-27	69.27459
Zone7-8	54.91114	zone27-28	63.14952
Zone8-9	65.23041	zone28-29	66.06298
Zone9-10	60.31906	zone29-30	61.31726
Zone10-11	52.10329	zone30-31	65.75615
Zone11-12	55.71841	zone31-32	58.10494
Zone12-13	60.71976	zone32-33	65.30652
Zone13-14	63.50042	zone33-34	63.91601
Zone14-15	63.98378	zone34-35	63.92597
Zone15-16	62.1255	zone35-36	59.82907
Zone16-17	60.36894	zone36-37	61.43591
Zone17-18	59.50955	zone37-38	64.80626
Zone18-19	55.10805	zone38-39	68.34461
Zone19-20	62.76925	zone39-40	76.12061

Рис. 7. Вектори швидкості повітря при обтіканні конічної труби та Zone(21-22) зокрема. Швидкість потоку 25 м/с

Рис. 8. Поле статичного тиску при обтіканні конусної труби. Швидкість потоку 25 м

рис. 9, показують, що цей висновок справедливий для широкого діапазону зміни швидкості потоку при його рівномірному профілі перед трубою.

Профіль швидкості набігаючого потоку

Як було встановлено в [9] основною причиною перепаду тисків по товщині стовбура, що впливає на експлуатаційні умови роботи димової труби та є основною причиною фільтраційних процесів через оболонку димової труби, є дія вітру.

Розглянемо вплив профілю швидкості набігаючого потоку на аеродинаміку та теплообмін конічної труби.

Згідно з [7] формула для профілю швидкості вітру біля поверхні землі має вигляд:

$$w_z = w_0 k(z), \quad (2)$$

де w_z – швидкість на висоті z від поверхні,

w_0 – середня швидкість потоку, $k(z)$ – коефіцієнт, що враховує зміну швидкості вітру з висотою z і розраховується за формулою:

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

Рис. 9. Середній коефіцієнт тепловіддачі для конусної труби:
1 – за формулою (1), 2 – модель

Значення параметрів k_{10} і a підбираються виходячи з типу місцевості та наведені в табл. 3 [7,8].

При розрахунках розглянуті три типи навколишньої місцевості: відкриті узбережжя морів, озер і водосховищ, сільські місцевості, в тому числі з будівлями висотою менше 10 м (тип А); міські території, лісові масиви та інші місцевості, рівномірно покриті перешкодами висотою більше 10 м (тип В); міські райони з щільною забудовою будинками заввишки більше 25 м (тип С).

Як видно з рис. 10, профілі швидкості вітру для різних типів місцевості мають нелінійний характер. При розрахунках профіль швидкості задавався на відстані 22 калібри від поверхні труби (рис.1).

Усереднений по висоті конічної труби коефіцієнт тепловіддачі для різноманітних значень швидкості вітру за рівномірним профілем швидкості і профілем швидкості для місцевості типу А і С показано на рис. 11. Як видно з графіків, профіль швидкості вітру перед трубою для різних типів місцевості має вагомий вплив на коефіцієнт тепловіддачі [10]. Це підтверджує необхідність врахування типу місцевості та профілю швидкості перед трубою на локальну тепловіддачу.

Рис. 10. Профіль швидкості вітру для різних типів місцевості: 1 – тип А, 2 – тип В, 3 – тип С

Таблиця 3. Типи місцевості та параметри до формули (3)

Тип місцевості	Характеристика місцевості	k_{10}	a
А	Відкриті узбережжя морів, озер і водосховищ, сільські місцевості, в тому числі з будівлями висотою менше 10 м, пустелі, степи, лісостепу, тундра	1.0	0.3
В	Міські території, лісові масиви та інші місцевості, рівномірно покриті перешкодами висотою більше 10 м	0.65	0.4
С	Міські райони з щільною забудовою будинками заввишки більше 25 м	0.4	0.5

Рис. 11. Залежність середнього по висоті конічної труби коефіцієнту тепловіддачі від середньої швидкості набігаючого потоку:
1 – рівномірний профіль,
2 – тип місцевості А, 3 – тип місцевості С

Висновки

1. Зміна статичного тиску, швидкості потоку і температури в кормовій частині має періодичний характер по висоті вертикальної конічної труби, що обумовлено специфічними умовами її обтікання.
2. Зміна локального коефіцієнта тепловіддачі по висоті конічної труби має періодичний характер. Найбільша тепловіддача спостерігається в зонах зниженого тиску в кормовій частині труби.
3. У широкому діапазоні зміни швидкості набігаючого потоку конусність труби не впливає на середню тепловіддачу труби.
4. Інфраструктура навколишнього простору має суттєвий вплив на профіль швидкості та середню тепловіддачу конічної труби, що повинно враховуватися в практичних розрахунках.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фіалко Н. М., Навродская Р.А., Шевчук С.И., Степанова А.И., Пресич Г.А., Гнедаш Г.А. Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок. – К.: Типография «Про формат», 2018. – 248 с.

2. Варламов Г.В., Любчик Г.М., Маляренко В.А., Теплотехнічні установки та екологічні аспекти виробництва енергії. Підручник. – Київ: політехніка, 2003. – 232 с.

3. Промышленные дымовые и вентиляционные трубы: справ. Изд. /Ф. П. Дужих, В. П. Осоловский, М. Г. Ладыгичев; под. ред. Ф. П. Дужих. – М.: «Теплотехник», 2004. – 464 с.

4. Жукаускас А.А., Жюгда И. Теплопередача цилиндра в поперечном потоке жидкости. Вильнюс: МОКСЛАС, 1979.

5. Achenbach E. Total and local heat transfer from a smooth circular cylinder in cross!flow at high Reynolds number // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 1975. V. 18. P. 1387–1396.

6. Roshko A. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number // J. Fluid Mechanics. 1961. № 10. P. 345–356.

7. Манеев А.П., Терехов В.И. Аэродинамика и теплообмен дымовых труб. – АНО Издательский Дом «Научное обозрение», 2017. –226 с.

8. ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи. Норми проектування [електронний ресурс] // <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-753>

9. Манеев А.П., Низовцев М.И., Терехов В.И. Влияние ветра на фильтрацию газов через оболочку дымовых труб // Теплоэнергетика. 2013. № 4. С. 20—26. DOI:10.1134/S0040363613040061.

10. Халатов А.А., Коваленко Г.В., Ильченко А.П., Олійник В.С., Шихабутінова О.В. Вплив інфраструктури навколишньої поверхні на теплообмін і аеродинаміку конічної димової труби ТЕС // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування», Харків, 27–28 квітня, 2021 р. НТУ «ХПІ» – С. 62-63.

AERODYNAMICS AND HEAT EXCHANGE OF SINGLE
END TUBE DURING EXTERNAL FLOWChyrkova A.P.¹, Khalatov A.A.^{1,2}, Oliynik V.S.²,
Shikhabutinova O.V.²¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky
Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremohy Ave., Kyiv,
03056, Ukraine²Institute 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.4.2021.3>

In Ukraine, the safety of modern thermal power plants depends on the reliable operation of the equipment installed on them. Unfortunately, the technical condition of the chimneys is not properly maintained. Of course, the modernization of basic equipment (boilers, switching to another type of fuel) leads to a decrease in the temperature of the exhaust gases. An important aspect to maintain the condition of the chimneys is to maintain the moisture of the exhaust gases.

An important feature of the external flow of chimneys are large Reynolds numbers $Re = wd/\nu$, which reach 10^6 and more. In the thermal calculation only the average heat transfer coefficient on the outer surface of the pipe is usually determined, and the features of aerodynamics and local heat transfer due to the conicity of the pipe are not taken into account.

The work is devoted to the study of aerodynamics and heat transfer in the air flow of a single conical chimney. The method of computer modeling with numerical integration of equations of motion and energy was used in the research. At the first stage, the single pipe with the uniform flow profile is considered. Further, the influence of the surrounding infrastructure on the aerodynamics and heat transfer of a single conical tube is studied.

The single conical vertical pipe with 40 m height, 1.7 m diameter at the base and 0.85 m in the mouth was used for the calculation. The computer model was calculated in the ANSYS2020-R1 program. The model is developed in a homogeneous area with the air environment. In order to obtain reliable results, the study was conducted to obtain the optimal set of the grid parameters for the heat transfer conditions. The grids with parameters that affect the distance of the first node from the cylinder wall (options a, b, c, d) and the rate of increase in the size of the elements as they move away from the area of interest (Growth rate GR) were studied. The type of the cylindrical pipe with constant diameter of 1.7 m has been chosen to analyze the sensitivity and to check the grid.

The turbulence model has been chosen as the following: RNG k- ϵ model which is common for the tasks of this class, the Enhanced Wall Function, the solution algorithm for the connection of the velocity pressure in stable flows Simplex. It is determined that in case if the distance between the first node from the cylinder wall and the area of interest (Growth rate GR) is more than 8 mm, instability and deviation of the obtained data from the values of the average coefficient of more than 20% appears. As a result of the research, the parameter grid area matching to the "2d" option of table 1 has been selected, i.e.: $GR = 1.1$, $h = 8$ mm. In the study of aerodynamics and heat transfer, the conical tube is conventionally divided into 22 sections (with 1 m height each). The case of uniform flow velocity in front of the pipe has been considered.

As seen, the maximum value of the heat transfer coefficient is in the Zone(21-22). The research shows that oncoming flow velocity of 25 m/s causes the average value of heat transfer coefficient of the conical pipe $62.5 \text{ W/m}^2\text{K}$, and $61.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ according to the known formula $\alpha = 7,3 \cdot w_x^{0,66}$. This indicates a small effect of taper on the average heat transfer of the entire pipe.

In the calculations, three types of surrounding areas are considered: A - open coasts of seas, lakes and reservoirs, rural areas, including buildings less than 10 m high; B - urban areas, forests and other areas, evenly covered with obstacles higher than 10 m; C - urban areas with dense buildings with buildings higher than 25 m. Thus, the wind speed profiles for different types of terrain are nonlinear.

The wind speed profile in front of the pipe (type of terrain) has a significant effect on the heat transfer coefficient. This confirms the need to take into account the type of terrain and the velocity profile in front of the pipe for local heat transfer.

References 10, figures 11, tables 3.

Key words: conical pipe, ANSYS 2020-R1, 3D model, grid parameters, terrain types.

1. Fialko N.M., Navrodska R.A., Shevchuk S.I., Stepanova A.I., Presich G.A., Gnedash G.A. Thermal methods of protection of gas exhaust ducts of boiler plants. – K.: Printing house "Pro format", 2018. – 248 p.

2. Varlamov G.V., Lyubchik G.M., Malyarenko V.A. Thermal installations and ecological aspects of energy production. tutorial. – Kyiv: Polytechnic, 2003. – 232 p.

3. *Industrial chimneys and ventilation pipes*: a reference book. Ed. / F.P. Duzhikh, V.P. Osolovsky, M.G. Ladygichev; under the editorship of F.P. Duzhikh. – M.: "Teplotekhnika", 2004. – 464 p.

4. Zhukauskas A.A., Zhyugda I. Heat transfer of a cylinder in a transverse flow of a liquid. Vilnius: MOKSLAS, 1979.

5. *Achenbach E.* Total and local heat transfer from a smooth circular cylinder in cross flow at high Reynolds number // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 1975. V. 18. P. 1387–1396.
6. *Roshko A.* Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number // J. Fluid Mechanics. 1961. № 10. P. 345–356.
7. *Maneev A.P., Terekhov V.I.* Aerodynamics and heat exchange of chimneys. – ANO Publishing House "Scientific Review", 2017. – 226 p.
8. *State Building Regulations B.1.2-2: 2006* Loads and impacts. Design standards [online] // <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-753>.
9. *Maneyev A.P., Nizovtsev M.I., Terekhov V.I.* The influence of wind on the filtration of gases through the shell of chimneys // Teploenergetika. 2013. No. 4. P. 20–26. DOI: 10.1134 / S0040363613040061.
10. *Khalatov A.A., Kovalenko G.V., Ilchenko A.P., Olyynik V.S., Shikhabutinova O.V.* Influencing the infrastructure of the navkolishny surface on the heat exchange and the aerodynamics of the final diesel pipe TES // Abstracts of the additional information of the International Science and Technology Conference "Energy and Heat Engineering Processes, 27-28 Construction" NTU "KhPI" - pp. 62-63.

Отримано 19.10.2021
Received 19.10.2021