

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 504.35;551.515.3

<https://doi.org/10.31713/vt420185>

Клименко М. О., д.с.-г.н., Кухнюк О. М., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ В ГЕНЕРОВАНИХ ВИХРОВИХ ПОВІТРЯНИХ ПОТОКАХ

Наведені результати є продовженням досліджень, що присвячені генерації вихрових потоків (торнадо). В результаті реалізації планованого експерименту, отримана математична модель, що дає змогу прогнозувати зміну температури повітря в верхніх шарах вихрових потоків (в межах факторів варіювання).

Ключові слова: генерація торнадо, планований експеримент, температура вихрових потоків.

1. Вступ

Вихрові стани повітряного середовища є одним із найбільш поширених типів руху як в природі, так і сучасних технічних приладах. Такі потоки характеризуються рухом в полі центробіжних сил та принципово відрізняються від осьових потоків газу такими параметрами як: осьова, обертальна, радіальна швидкості, градієнтами статичного і повного тиску, наявністю турбулентності і т.ін. Специфічні властивості закручених потоків на сьогоднішній день висвітлені в багатьох роботах як вітчизняних, так і закордонних дослідників. Проте запитання щодо дослідження тепломасообмінних процесів, динаміки і умов виникнення торнадоподібних станів повітряного середовища залишаються актуальними і потребують подальшого вивчення.

Наведена нижче методика прогнозування температурних режимів в умовах закрученого повітряного потоку дала змогу визначитись з основними значущими параметрами, режимами і часовими характеристиками, що призводили до зміни досліджуваних показників.

Вивчення зміни температурних показників в верхніх шарах вихрових потоків проводилось за допомогою планованого експерименту на установці, що була описана [1].

Досліди проводились у режимі, визначеному матрицею трифакторного плану Бокса-Бенкіна (табл. 1).



Були обрані наступні фактори, варіювання (дослідження):

- Оберти двигуна – V_d ;
- Кут направляючих (що створюють вихровий рух повітря в установці) в нижній частині установки – α ;
- Площа відкриття повітряних заслонок (для регулювання об'єму повітря, що прокачувалось через установку) – S_z .

Таблиця 1

Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вигляд	Кодований вигляд	-1	0	+1	
Оберти двигуна – V_d	X_1	1500	2000	2500	500
Кут направляючих – α ;	X_2	5°	10°	15°	5°
Відношення площі відкритих повітряних заслонок до загальної площі установки – S_z	X_3	0,2	0,25	0,3	0,05

За вихідні параметри при дослідженні вихрового руху повітря була прийнята абсолютна різниця зміни температури в верхньому шарі вихрового руху на початку дослідіу і через часовий проміжок 20 хвилин

$$\Delta t = t_{20} - t_0.$$

Такий вибір параметра диктувався наступними підходами:

- знівелювати перепад температури в приміщенні, де проводиться дослід та можливі абсолютні похибки датчиків;
- фіксувати температуру в найбільш віддаленому шарі повітря від направляючих повітря (найменший ефект).

Вимірювання температурних показників проводились за допомогою датчиків ВМЕ280 5В І2С (датчик температури, вологості, тиску) з інтерфейсом підключення І2С (автоматичне зняття показників) і роздільною здатністю 0,01°С, похибкою $\pm 1^\circ\text{C}$.

Режими проведення дослідів і отримані значення вихідного параметра наведені в табл. 2.

Датчики: T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 – розташовувались: T_1 – на вході повітря в установку (направляючі повітря), T_2, T_3, T_4, T_5 – по радіусу установки (0,3 м) від центру до бокової поверхні.

З табл. 2 витікає, що найбільша різниця температури, в сторону зниження, фіксувалось в прицентрових областях вихору (покази да-

тчиків T_2 і T_3) з подальшим зменшенням ефекту, при збільшенні радіусу (T_4 , T_5). В той же час зміна вихідного параметра, яке спостерігалось, залежить від сполучень різних варіацій змінних факторів.

Таблиця 2

Режими проведення дослідів

Точки плану	Шифр призм	Режими навантаження			Датчики температури (вихідний параметр)				Δt_{cep}
		V_d Оберти вентиллятора	α кут напрямляючих	S_z Площа заслонок	T_2	T_3	T_4	T_5	
1	Д-1/90	2500	15	0.25	-0,15	-0,18	-0,17	-0,15	-0,1625
2	Д-2/90	1500	5	0.25	-0,26	-0,28	-0,2	-0,15	-0,2225
3	Д-3/90	2500	5	0.25	-0,3	-0,05	-0,03	-0,01	-0,0975
4	Д-4/90	1500	15	0.25	-0,31	-0,2	-0,15	-0,14	-0,2
5	Д-5/90	2500	10	0.3	-0,3	-0,08	-0,06	-0,03	-0,1175
6	Д-6/90	1500	10	0.2	-0,44	-0,3	-0,21	-0,17	-0,28
7	Д-7/90	1500	10	0.3	-0,22	-0,17	-0,14	-0,1	-0,1575
8	Д-8/90	2500	10	0.2	-0,38	-0,14	-0,13	-0,09	-0,185
9	Д-9/90	2000	15	0.3	-0,43	-0,35	-0,28	-0,25	-0,3275
10	Д-10/90	2000	5	0.2	-0,5	-0,26	-0,18	-0,14	-0,27
11	Д-11/90	2000	5	0.3	-0,35	-0,33	-0,29	-0,22	-0,2975
12	Д-12/90	2000	15	0.2	-0,53	-0,44	-0,34	-0,31	-0,405
13	Д-13/90	2000	10	0.25	-0,06	-0,04	0	-0,02	-0,03
14	Д-14/90	2000	10	0.25	-0,2	-0,13	-0,11	-0,09	-0,1325
15	Д-15/90	2000	10	0.25	-0,1	-0,04	-0,05	-0,02	-0,0525

В найбільшій мірі збільшення вихідного параметра при мінімальних обертах двигуна залежить від куту відкриття напрямляючих α . Тут встановлено тенденцію зменшення температури (Δt_{cep}) зі зменшенням куту відкриття закрилок при фіксованих значеннях інших параметрів V_d та S_z . Наприклад, в точках плану за постійних $V_d=1500$ та $S_z=0,25$ і зменшення куту α від 15° до 5° відповідні значення Δt_{cep} дорівнюють $-0,2$ та $-0,2225$ (точки плану 4, 2). При максимальних обертах спостерігається зворотна тенденція - в точках плану при $V_d=2500$ та $S_z=0,25$ Δt_{cep} зменшується від $-0,1625$ до $-0,0975$ (точки плану 1,3).

Менш інтенсивно впливає на зміну температури швидкість обертів двигуна. Цей вплив тим відчутніший, чим менша площа відкритих секторів (по відношенню до загальної площі установки по ге-



нерації торнадоподібного руху повітря). Так при $S_z=0,3$ та $\alpha=10^\circ$ і збільшенні обертів, фіксувалась зміна різниці температур відповідно від $-0,1575$ до $-0,1175$ (точки плану 7, 5), а при $S_z=0,2$ та $\alpha=10^\circ$ і збільшенні числа обертів від 1500 до 2500 призводило до перепаду від $-0,28$ до $-0,185$ (точки плану 6, 8).

Зміна площі S_z секторів (заслонок) в верхній частині установки при різних комбінаціях інших параметрів призводили до незначних змін вихідного параметра: зменшення S_z від 0,3 до 0,2 (точки плану 9,12) призводить до незначного збільшення Δt_{cep} $-0,3275$ та $-0,405$, а в точках плану 11, 10 – до зменшення від $-0,2975$ до $-0,27$.

На підставі вище описаного планованого експерименту віднайдені математичні моделі, які описують зміну температурного режиму для прицентрової області (за даними датчика № 2) верхньої частини вихрового потоку.

З урахуванням кодованих значень факторів та відповідності граничним умовам при довірчій імовірності 0,95 отримані наступні рівняння регресії:

$$k_{\Delta t_2} = -0,12 + 0,0075 X_1 + 0,00875 X_2 + 0,06875 X_3 - 0,00871 X_1^2 - 0,1262 X_2^2 - 0,2062071 X_3^2 + 0,025 X_1 X_2 - 0,005 X_1 X_3 - 0,0275 X_2 X_3, \quad (1)$$

$$\text{де } X_1 = \frac{V_d - 2000}{500}, \quad X_2 = \frac{\alpha - 10}{5}, \quad X_3 = \frac{S_z - 0,25}{0,05}.$$

Співставлення параметрів, отриманих дослідним шляхом із теоретичними, які були знайдені за залежністю (1) свідчить про їх близьке збігання (табл. 3).

Таблиця 3

Порівняльна таблиця збігання дослідних і теоретичних даних зміни досліджуваного параметра

Шифр	Різниця температур		Відхилення	
	Дослідні $\Delta_{t2д}$	Теоретичні $\Delta_{t2т}$	$\Delta_{t2} = \Delta_{t2д} - \Delta_{t2т}$	$\Delta_{t2} = (\Delta_{t2д} - \Delta_{t2т})^2$
Д-1/90	-0,15	-0,150	0,000	0,000
Д-2/90	-0,26	-0,246	-0,014	0,000
Д-3/90	-0,3	-0,281	-0,019	0,000
Д-4/90	-0,31	-0,279	-0,031	0,001
Д-5/90	-0,3	-0,264	-0,036	0,001
Д-6/90	-0,44	-0,416	-0,024	0,001
Д-7/90	-0,22	-0,269	0,049	0,002
Д-8/90	-0,38	-0,391	0,011	0,000

продовження табл. 3

Д-9/90	-0,43	-0,402	-0,028	0,001
Д-10/90	-0,5	-0,557	0,057	0,003
Д-11/90	-0,35	-0,365	0,015	0,000
Д-12/90	-0,53	-0,485	-0,045	0,002
Д-13/90	-0,06	-0,120	0,060	0,004
Д-14/90	-0,2	-0,120	-0,080	0,006
Д-15/90	-0,1	-0,120	0,020	0,000

При цьому, розрахункові значення критерію Фішера були значно менші за теоретичні (табл. 4), що в свою чергу говорить про велику тісноту кореляційного зв'язку і надійність отриманих моделей. Підтвердженням останнього висновку можуть слугувати і статистики за варіаційними рядами, наведені для порівняльної табл. 4.

Таблиця 4

Порівняльна таблиця оціночного критерію Фішера при визначенні коефіцієнтів рівнянь регресії (1)

	Вихідний параметр
	Δt
Розрахунковий критерій Фішера	1,4457
Теоретичний критерій Фішера	6,94

Оскільки основні закономірності зміни температури були описані вище, зупинимося тільки на особливостях динаміки проходження цих процесів, виходячи з аналізу графічних інтерпретацій отриманої моделі.

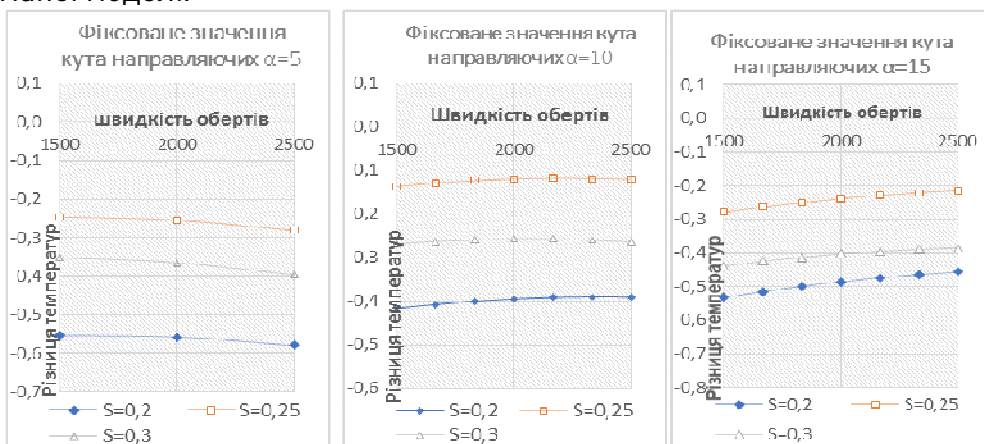


Рис. 1. Вплив частоти обертів вентилятора

Стосовно впливу частоти обертів двигуна можна прийти до ви-

сновку, що вплив його при різних фіксованих значеннях направляючих має майже прямолінійну залежність. Спираючись на наведені графіки, виділимо певні особливості:

- при збільшенні кута направляючих від 5 до 15 градусів – поступово змінюється направленість залежностей: якщо збільшення частоти обертів – призводить до поступового зменшення температури при $\alpha=5^\circ$, то вже при $\alpha=15^\circ$ спостерігається зворотна послідовність (див. рис. 1);

- при будь-яких комбінаціях обраних факторів – найбільший ефект зменшення температури спостерігається при найменшій площі відкритих заслонок (зменшення об'єму проходження повітря), особливо при $\alpha=5^\circ$ (збільшення закрутки вхідного потоку).

Не таким однозначним виявився вплив відкритої площі верхніх заслонок. Тут спостерігається найменший «оптимум», зміщення від якого призводить до більш ефективного зменшення вихідного параметра Δt .

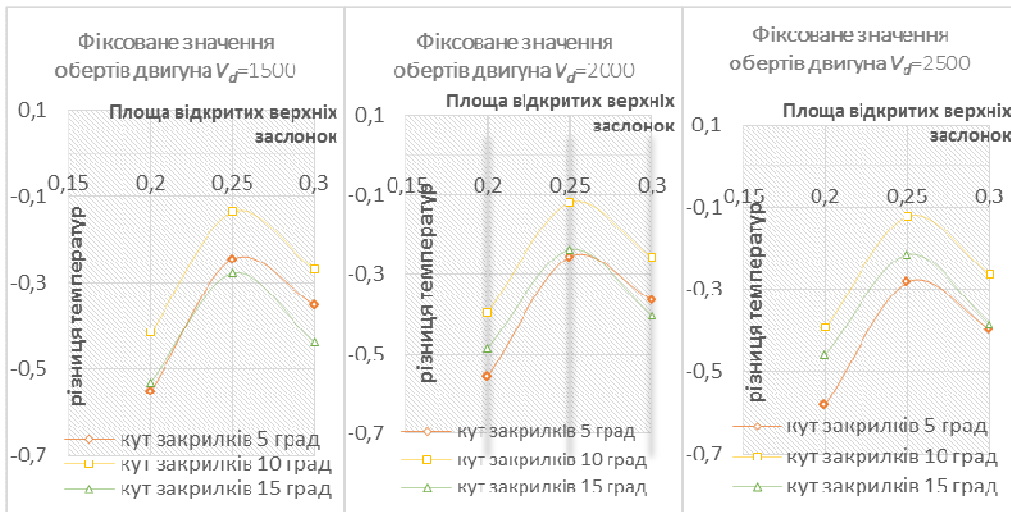


Рис. 2. Вплив відкритих заслонок (площі S_z)

Цьому оптимуму відповідає значення $S_z=0,25$. Отриманий графік має явно виражену криволінійну залежність, з найбільшим мінімумом при $S_z=0,2$. Причому, у поєднанні із збільшенням частоти обертів, все більш суттєвим стає вплив такого фактору як кут направляючих закрилків, особливо найменшого його значення при $\alpha=5^\circ$ від -0,531 при обертах 1500 до -0,58 при обертах 2500 (див. рис. 2).

Висновок. Обрані фактори варіювання планованого експерименту мають різний ступінь впливу на досліджувану зміну температури в повітряному вихровому потоці. Причому найбільший ефект спостерігався тільки при певних їх комбінаціях. Найбільша різниця температур спостерігалась при найменших значеннях направляючих повітря ($\alpha=5^\circ$) та найменшому значенні відношення площі відкритих повітряних заслонок до загальної площі установки – S_z . Тобто частота обертів двигуна грала другорядну роль по відношенню до параметрів, які забезпечують ступінь закрутки повітряних потоків, що в свою чергу говорить про значний вплив стійких вихрових станів повітря на зміну температури в сторону зниження. Такі висновки підтверджуються і природними вихровими явищами у вигляді торнадо, що завжди супроводжується різким зменшенням температури. В той же час, поведінка вихрових утворень (його математичні моделі), в розрізі обраних факторів, говорить про необхідність подальшого дослідження цих процесів і уточнення умов генерації та формування торнадоподібних повітряних мас.

1. Клименко М., Кухнюк О. М. Експериментальне дослідження вихрових повітряних потоків. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2018. Вип. 3(83). С. 94–102. 2. Пиралишвили Ш. А., Поляев В. М., Сергеев М. Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / под ред. А. И. Леонтьева. М. : УНПЦ «Энергомаш», 2000. 412 с. 3. Haan F. L., Sarkar P. P., Gallus W. A. Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications. *Engineering Structures*. 2008. V. 30. P. 1146–1159. 4. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. Торнадо. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. 344 с.

REFERENCES:

1. Klymenko M., Kukhniuk O. M. Eksperymentalne doslidzhennia vykhrovykh povitrianykh potokiv. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky* : zb. nauk. prats. Rivne : NUVHP, 2018. Vyp. 3(83). S. 94–102. 2. Piralishvili Sh. A., Poliaev V. M., Serheev M. N. Vikhrevoi effekt. Eksperiment, teoriia, tekhnicheskije resheniia / pod red. A. I. Leonteva. M. : UNPTs «Enerhomash», 2000. 412 s. 3. Haan F. L., Sarkar P. P., Gallus W. A. Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications. *Engineering Structures*. 2008. V. 30. P. 1146–1159. 4. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeitsev V. N. Tornado. M. : FYZMATLYT, 2011. 344 s.

Рецензент: к.с.-г.н., професор Прищеп А. М. (НУВГП)



**Klymenko M. O., Doctor of Agricultural Sciences, Professor,
Kukhniuk O. M., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor**
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

INVESTIGATION OF TEMPERATURE REGIMES IN GENERATED VORTEX AIR FLOWS

The presented results are a continuation of studies devoted to the generation of vortex flows (tornadoes). As a result of the planned experiment, a mathematical model was obtained that allows to predict the change in the air temperature in the upper layers of vortex flows (within the variation factors).

The vorticial atmospheric conditions are one of the most common types of motion, both in nature and in modern technical devices. Such flows are characterized by the movement in the field of centrifugal forces and fundamentally different from the axial flows of gas by parameters such as: axial, rotational, radial velocity, gradients of static and full pressure, turbulence, etc.

The following methodology for predicting temperature regimes under the conditions of swirling air flow has made it possible to determine the main significant parameters, modes and time characteristics that led to changes in the studied parameters.

The study of changes in temperature indices in the upper layers of vortex flows was carried out with the help of a planned experiment on the installation described [1].

Experiments were carried out in a mode determined by the matrix of the three-factor plan of Box-Behnken (Table 1).

The following factors, variations (studies) were selected:

Engine revolutions – V_d ;

Angle of guides (creating vortex air movement in the installation) at the bottom of the installation – α ;

The area of opening of air damper (for adjusting the volume of air pumped through the installation) – S_z .

The chosen variables of the planned experiment have different degrees of influence on the studied temperature change in the air vortex flow.

The greatest effect was observed with certain combinations of factors. The greatest temperature difference was observed at the lowest values of the air guides ($\alpha = 5^\circ$) and the smallest value of the ratio of open air damper to the total installation area S_z . That is, the engine

speed played a minor role in relation to the parameters that provide the degree of twisting of air flows, which in turn speaks of the significant effect of stable vortical states of air on temperature change towards the decrease. Such conclusions are confirmed by natural vortical phenomena in the form of a tornado, which is always accompanied by a sharp decrease in temperature. At the same time, the behavior of vortex entities (its mathematical models), in terms of the selected factors, suggests the need for further study of these processes and clarification of the conditions of generation and formation of tornado-like air masses.

***Keywords:* tornado generation, planned experiment, temperature of vortex flows.**

Клименко Н. О., д.с.-х.н., профессор, Кухнюк О. Н., к.т.н., доцент
(Национальный университет водного хозяйства и
природопользования, г. Ровно)

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ В ГЕНЕРИРОВАННЫХ ВИХРЕВЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКАХ

Наведены результаты, которые продолжают исследования по генерации вихревых потоков (торнадо). В результате реализованного планированного эксперимента была получена математическая модель, которая дает возможность прогнозировать изменение температуры воздуха в верхних слоях вихревых структур (в границах факторов варьирования).

***Ключевые слова:* генерация торнадо, планированный эксперимент, температура, вихревые структуры.**
