

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРА ЗАКРУТКИ В ГЕНЕРОВАНИХ ВИХРОВИХ ПОВІТРЯНИХ ПОТОКАХ

Наведені результати є продовженням досліджень, що присвячені генерації вихрових потоків (торнадо). В результаті реалізації планованого експерименту, отримано математичну модель, що дає змогу прогнозувати зміну вертикальних і горизонтальних складових швидкості руху вихрових потоків (в межах факторів варіювання).

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

1. Вступ. Параметр закрутки

Теоретичні та експериментальні дослідження вихрових (закручених потоків) вказують на те, що їх параметри в великій мірі залежать від інтенсивності (параметру) закрутки. Визначення цього безрозмірного показника до цього часу викликають суперечки серед науковців [1-3], проте наведемо найбільш простий вираз для параметра закрутки S .

$$S = \frac{U_{\varphi}}{U_z},$$

де U_{φ} – азимутальна (тангенціальна швидкість);

U_z – осьова (вертикальна швидкість).

Фізичний зміст даного виразу полягає в наступному: якщо $S \ll 1$ – малі азимутальні швидкості та великі осьові швидкості – то закрутка вихору мала, в іншому випадку, $S \gg 1$ (великі азимутальні швидкості, малі осьові швидкості), закрутка потоку велика. Як правило, вважається, що при $S \cong 1$ і більше, закрутка потоку велика.

Аналіз дослідних даних дозволяє визначити величину параметра закрутки. Дійсно отримуємо співвідношення:

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{U_{\varphi}}{U_z} = S,$$

де α – кут між векторами швидкостей.

Обробка в режимі планованого експерименту результатів дозволила визначити діапазон зміни параметра закрутки в межах $S = 0,07-0,20$. Наведемо основні параметри експерименту та їх результати.

Використовувалась методика дослідження, в режимі планованого експерименту на установці, що була описана [4]. Такий підхід дає змогу визначати (прогнозувати) зміну параметру закрутки вихрових потоків в межах обраних факторів.

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 вихідний параметр було прийнято параметр закрутки вихрових потоків

$$S = \frac{U_{\varphi}}{U_z}.$$

Вимірювання швидкостей проводились за допомогою анемометра BENETECH GM8901 з межами вимірювання від 0 до 45 м/с (88MPH), відносною похибкою 3% і мінімальним кроком вимірювання 0,2 м/с.

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

З таблиці 2 витікає, що закрутка генерованого повітряного потоку коливається в межах від 0,068 до 0,211. Якщо відштовхуватись від наведених вище залежностей, що визначають ступінь закрутки потоків – то загальна закрутка отриманого потоку в переважній бі-

льшості дослідів на середньому рівні. В той же час, зміна вихідного параметра, яка спостерігалась, залежала від сполучень різних варіацій змінних факторів.

Таблиця 2

Режими проведення дослідів

Точки плану	Шифр призм	Режими навантаження (змінні фактори)			Значення швидкостей (вихідний параметр)		$S = \frac{U_{\phi}}{U_z}$ параметр закрутки
					U_{ϕ}	U_z	
		V_d Оберти вентиллятора	α кут на правляючих	S_z Площа заслонок	азимутальна (тангенціальна швидкість)	осьова (вертикальна швидкість)	
1	Д-1/90	2500	15	0,25	1,10	6,60	0,166
2	Д-2/90	1500	5	0,25	0,30	4,40	0,068
3	Д-3/90	2500	5	0,25	0,60	5,00	0,120
4	Д-4/90	1500	15	0,25	0,20	4,50	0,0444
5	Д-5/90	2500	10	0,3	1,10	6,50	0,1692
6	Д-6/90	1500	10	0,2	0,90	5,00	0,180
7	Д-7/90	1500	10	0,3	0,50	4,60	0,108
8	Д-8/90	2500	10	0,2	1,00	6,00	0,166
9	Д-9/90	2000	15	0,3	1,25	5,90	0,211
10	Д-10/90	2000	5	0,2	1,20	5,90	0,203
11	Д-11/90	2000	5	0,3	1,00	5,40	0,185
12	Д-12/90	2000	15	0,2	1,10	5,90	0,186
13	Д-13/90	2000	10	0,25	1,00	5,70	0,175
14	Д-14/90	2000	10	0,25	1,05	5,50	0,191
15	Д-15/90	2000	10	0,25	1,10	5,60	0,196

Зміна закрутки згенерованих потоків є неоднозначною і коливається як в сторону збільшення, так і зменшення. Виділимо точки (досліди), яким відповідає найбільша за інтенсивністю зміна вихідного параметра при фіксації двох незмінних факторів.

При такому підході, проявляється суттєвий вплив такого фактору, як швидкість обертів вентиллятора. Наприклад, в точках плану за постійних $\alpha=15^\circ$ і $S_z=0,25$ збільшення V_d від 1500 до 2500 обертів призводить до підвищенні закрутки потоку на 75% (точки плану 4,1), а в точках 2,3 (фіксовані $\alpha=5^\circ$ і $S_z=0,25$) на 45%.

Зміна об'єму повітря, що проходило через установку (S_z) приз-

води́ла до суттєвого збільшення параметру закрутки повітря лише при малих обертах установки $V_d = 1500$. Так в дослідах 7,6 (при фіксованих $V_d = 1500$ та $\alpha=10^\circ$) зміна S_z від 0,3 до 0,2 збільшує вихідний параметр на 40%, а при фіксованих $V_d = 2500$ та $\alpha=10^\circ$ (точки плану 5, 8) зменшення площі повітряних заслонок практично не впливає на досліджуваний параметр (S_z).

Зміна фактору α (кут впускних направляючих для повітря) при різних комбінаціях інших параметрів призводили до незначних змін вихідного параметра: зменшення α від 15° до 5° (точки плану 9, 11) призводить до незначного зменшення S_z від 0,211 до 0,185, а в точках плану 12, 10 – до зворотного ефекту (збільшення на 9% від 0,186 до 0,203).

На підставі вище описаного планованого експерименту віднайдені математичні моделі, які описують зміну показника закрутки вихрового потоку повітря в межах варійованих факторів.

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

$$k_{S_z} = 0,1876 + 0,0180X_1 + 0,0272X_2 - 0,0077X_3 - 0,0642X_1^2 - 0,0236X_2^2 + 0,0327X_3^2 + 0,0057X_1X_2 + 0,0118X_1X_3 + 0,0024X_2X_3, \quad (1)$$

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

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 $S = \frac{U_{\varphi}}{U_z}$	Теоретичні $S = \frac{U_{\varphi}}{U_z}$	$\Delta_S = \Delta_{S_d} - \Delta_{S_t}$	$\Delta_S^2 = (\Delta_{S_d} - \Delta_{S_t})^2$
Д-1/90	0,1667	0,1508	0,0159	0,0003
Д-2/90	0,0682	0,0603	0,0079	0,0001
Д-3/90	0,1200	0,0849	0,0351	0,0012
Д-4/90	0,0444	0,1032	-0,0588	0,0035
Д-5/90	0,1692	0,1783	-0,0090	0,0001
Д-6/90	0,1800	0,1576	0,0224	0,0005
Д-7/90	0,1087	0,1186	-0,0099	0,0001
Д-8/90	0,1667	0,1700	-0,0034	0,0000
Д-9/90	0,2119	0,2186	-0,0068	0,0000
Д-10/90	0,2034	0,1796	0,0238	0,0006
Д-11/90	0,1852	0,1593	0,0258	0,0007
Д-12/90	0,1864	0,2291	-0,0427	0,0018
Д-13/90	0,1754	0,1876	-0,0122	0,0001
Д-14/90	0,1909	0,1876	0,0033	0,0000
Д-15/90	0,1964	0,1876	0,0088	0,0001

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 таблиці 4.

Таблиця 4

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

	Вихідний параметр
	$S = \frac{U_{\varphi}}{U_z}$
Розрахунковий критерій Фішера	3,722
Теоретичний критерій Фішера	19,25

Графічні інтерпретації отриманої математичної, які наведені нижче, дають змогу проаналізувати динаміку змін закрутки повітряних потоків.

Оскільки основні закономірності зміни температури були описані вище, зупинимося тільки на особливостях цих процесів, виходячи з наступних рисунків.

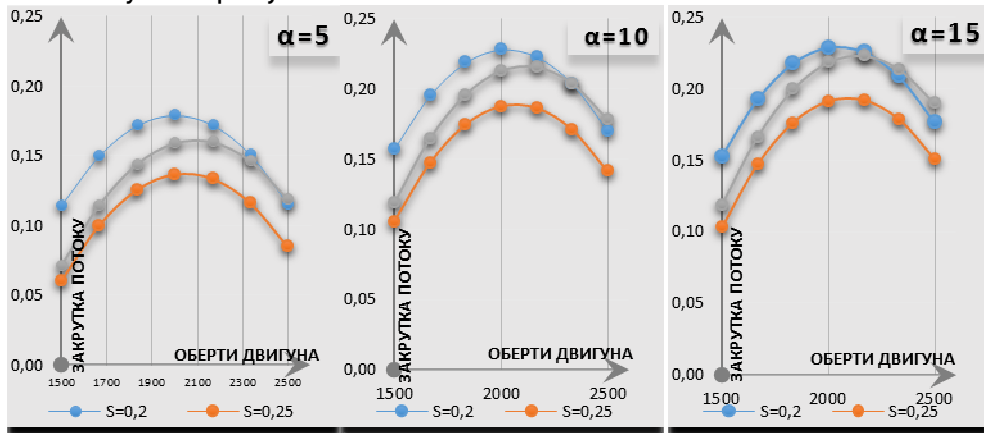


Рис. 1. Вплив частоти обертів вентилятора V_d (при фіксованих значеннях α , в залежності від площі відкриття закрилків S_z) на вихідний параметр

$$S = \frac{U_\varphi}{U_z}$$

Як видно з рис. 1 поступове збільшення обертів двигуна при фіксованих значеннях інших факторів варіювання має криволінійну залежність. Початкове збільшення закрутки потоку стабілізується на рівні 1800-2200 обертів і подальше збільшення частоти обертання призводить до спадання вихідного параметра.

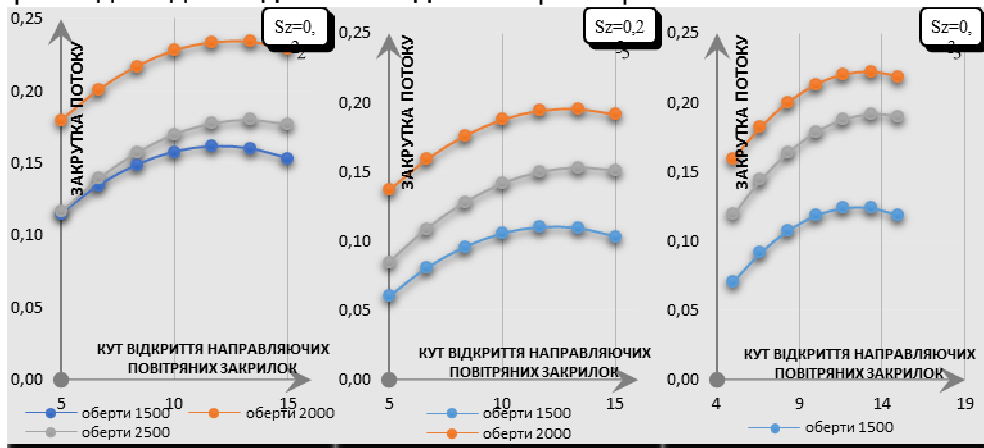


Рис. 2. Вплив кута відкриття направляючих повітряних закрилок α на вихідний параметр $S = \frac{U_\varphi}{U_z}$ (при фіксованих значеннях площі відкриття закрилків S_z , на різних обертах V_d)

В свою чергу, збільшення кута направляючих закрилок, практично при будь-яких комбінаціях варіювання інших змінних факторів показує поступову криволінійну динаміку збільшення закрутки потоку (рис. 2).

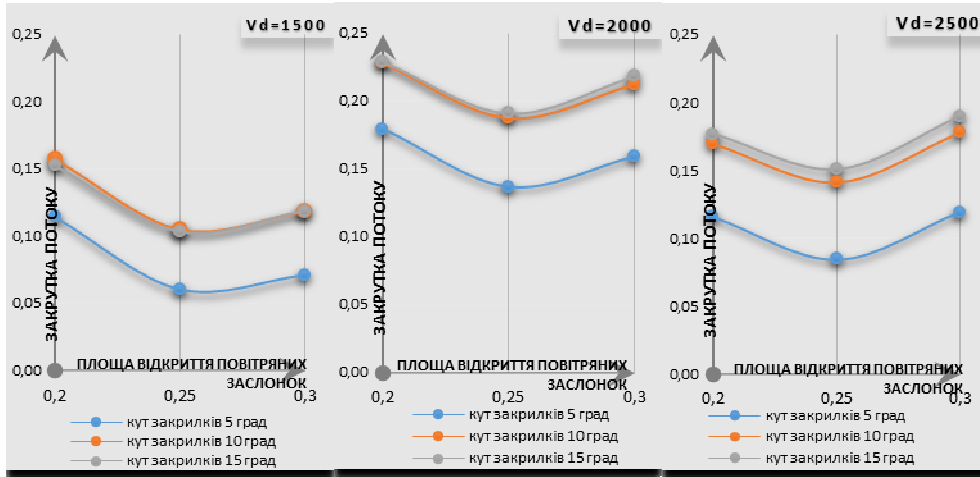


Рис. 3. Вплив площі відкриття заслонок S_z на вихідний параметр $S = \frac{U_\varphi}{U_z}$

(при фіксованих значеннях і відповідних кутах відкриття направляючих закрилків α)

Не таким однозначним виявився вплив відкритої площі верхніх заслонок. Тут спостерігається найменший «оптимум» на рівні $S_z = 0,25$ зміщення від якого в сторону зменшення $S_z = 0,20$) при малих обертах установки ($V_d = 1500$) призводить до значного росту ви-

хідного параметру $S = \frac{U_\varphi}{U_z}$, а при $V_d = 2000 \dots 2500$ закрутка згенеро-

ваних повітряних потоків починає більш інтенсивно зростати при збільшенні площі відкриття заслонок ($S_z = 0,30$) (див. рис. 3).

Висновок. Обрані фактори варіювання планованого експерименту мають різний ступінь впливу на досліджувану зміну закрутки повітряного вихрового потоку. Причому найбільший ефект спостерігався тільки при певних їх комбінаціях.

Наприклад, постійний ефект підвищення закрутки висхідного повітряного потоку спостерігається при середніх значеннях швидкості обертання установки ($V_d = 1800 \dots 2200$).

Вплив направляючих повітря (α°) грала другорядну роль по від-

ношенню до інших обраних факторів варіювання, які забезпечують ступінь закрутки повітряних потоків і в свою чергу виявлено мінімальний «оптимум» закрутки повітря при значеннях площі відкриття заслонок $S_z = 0,25$.

Невеликі значення параметра закрутки, отриманні в даному експерименті, говорять про суттєве перевищення вертикальних складових швидкості над тангенціальними складовими в створених в дослідній установці повітряних закручених потоках. В свою чергу, отримані в експериментах високі значення осьової (вертикальної) складової підтверджують схожі результати у інших дослідників [5] і можуть говорити про те, що згенеровані в лабораторних умовах вихрові стриктури мають дуже схожу з реальними повітряними смерчам структуру і можуть пояснювати ефекти підважування з наступним переносом важких предметів під час реальних торнадо.

1. Jischke M. C., Parang M. Properties of simulated tornado-like vortices. *J. Atmospheric Sciences*. 1974. V. 31, № 3. P. 506–512. 2. Leslie F. W. Surface roughness effects on suction vortex formation: a laboratory simulation. *J. Atmospheric Sciences*. 1977. V. 34, № 7. P. 1022–1027. 3. Church C. R., Snow J. T., Agee E. M. Tornado vortex simulation at Purdue University. *Bull. Amer. Met. Soc.* 1977. V. 58, № 9. P. 900–908. 4. 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. 5. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. Торнадо. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. 344 с.

REFERENCES:

1. Jischke M. C., Parang M. Properties of simulated tornado-like vortices. *J. Atmospheric Sciences*. 1974. V. 31, № 3. P. 506–512. 2. Leslie F. W. Surface roughness effects on suction vortex formation: a laboratory simulation. *J. Atmospheric Sciences*. 1977. V. 34, № 7. P. 1022–1027. 3. Church C. R., Snow J. T., Agee E. M. Tornado vortex simulation at Purdue University. *Bull. Amer. Met. Soc.* 1977. V. 58, № 9. P. 900–908. 4. Klymenko M., Kukhniuk O. M., Eksperymentalne doslidzhennia vykhrovykh povitrianykh potokiv. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky* : zb. nauk. prats. Rivne : NUVHP, 2018. Vyp. 3(83). С. 94–102. 5. Varaksyn A. Yu., Romash M. E., Kopeitsev V. N. Tornado. M. : FYZMATLYT, 2011. 344 s.

**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 THE TWIST PARAMETER IN GENERATED VORTEX AIR FLOWS

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

Theoretical and experimental studies of vortices indicate that their parameters to a large extent depend on the intensity (parameter) of the twist. Here is the simplest expression for the spin parameter S . $S = U_\phi / U_z$ where: U_ϕ – azimuthal (tangential velocity), U_z – axial (vertical velocity).

The physical meaning of this expression is as follows:

If $S \ll 1$ – small azimuthal velocities and large axial velocities – then the vortex of the vortex is small; otherwise, $S \gg 1$ (large azimuthal velocities, small axial velocities), the spin of the flow is large. As a rule, in practice, it is assumed that at $S \cong 1$ and more the twist of the flow is large.

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_α ;

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 .

Selected variables of the planned experiment have different degrees of influence on the studied change in the vortex of the vortex stream. Moreover, the greatest effect was observed only with certain combinations.

For example, the constant effect of increasing the spin of ascending air flow is observed at the mean values of the rotational speed of the installation ($V_\alpha = 1800 \dots 2200$).

The influence of air guides (α_0) played a minor role in relation to other

selected variation factors, which ensure the degree of twisting of air flows, and in turn revealed the minimum optimum of air twist at the values of the opening area of the damper $S_z = 0,25$.

The small values of the spin parameter obtained in this experiment indicate a significant excess of vertical component velocities above the tangential components in the aerial spin flows created in the experimental installation. In turn, the high values of the axial (vertical) component obtained in experiments confirm the similar results from other researchers can say that the laboratory-generated vortex strictures are very similar to the actual structure of air vents and can explain the effects of bracketing with the next transfer of heavy items during real tornadoes.

***Keywords:* generation of tornadoes, planned experiment, twist of vortex flows.**

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

ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРА ЗАКРУТКИ В ГЕНЕРИРОВАННЫХ ВИХРЕВЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКАХ

Приведенные результаты являются продолжением исследований, которые посвящены генерации вихревых потоков (торнадо). В результате реализации планируемого эксперимента получена математическая модель, которая дает возможность прогнозировать изменение вертикальных и горизонтальных составляющих скорости движения вихревых потоков (в пределах факторов варьирования).

***Ключевые слова:* генерация торнадо, планированный эксперимент, закрутка вихревых потоков.**
