

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

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХРОВИХ ПОВІТРЯНИХ ПОТОКІВ**

**Наведена класифікація, характеристика, переваги та недоліки експериментальних установок по генерації вихрових потоків (торнадо). Досліджено розвиток сучасних експериментальних підходів. На базі існуючого світового досвіду, запропонована нова модель, що дозволить більш ґрунтовно вивчити фізичні властивості вихрових повітряних потоків.**

**Ключові слова:** експеримент, класифікація, вихрові потоки, торнадо.

**Вступ.** Вихрові (або закручені) потоки надзвичайно широко розповсюджені в природі (атмосферні циклони, піщані бурі, повітряні смерчі, тайфуни, лісові пожежі). На сьогоднішній день ці явища все більше цікавлять дослідники як в розрізі глобальних кліматичних змін, так і намаганням впровадити основи вихрового руху при застосуванні у багатьох технічних рішеннях (вихрові труби, циклонні сепаратори, відцентрові форсунки, вихрові ячейки, різні турбулізатори і т. п.) [1].

Сучасні лабораторні дослідження які імітують природні торнадо можна поділити на дві категорії:

обмежені стінками стаціонарні повітряні вихри, що формуються внаслідок використання вентиляторів, механічних закручуючих пристроїв (направляючі, що призначені створити вихрові потоки, гвинтові шнеки, внутрішнє спіральне влаштування ребер і т.і.), а також шляхом тангенціального соплового підводу середовища та інтенсивного обертання корпусних елементів (труби) [2-11].

Генератори торнадоподібних вихорів, що не обмежуються стінками.

**Аналіз досліджень.** В перших роботах, що були виконані в Католицькому університеті Америки (Catholic University of America, Washington) [2-3], були спроби моделювання смерчів в лабораторії шляхом формування закрученого і обмеженого стінками вихрового

руху з використанням розташованого зверху установки вентилятора і екрана, що обертався.

Циркуляція і швидкість повітряного потоку (висхідного) в цьому випадку змінювалися незалежно один від одного. Інтенсивність обертання визначалося кутовою швидкістю обертання екрану, а витрати висхідного потоку – частотою обертання вентилятора. З використанням термоанемометра були отримані розподіл швидкостей для різних значень циркуляції. Причому, отримані розподіли азимутальних швидкостей були дуже близькими до відповідних розподілів в природних торнадо, проте відносні значення радіальних і висхідних швидкостей були набагато нижче, що спостерігаються у реальних смерчах.

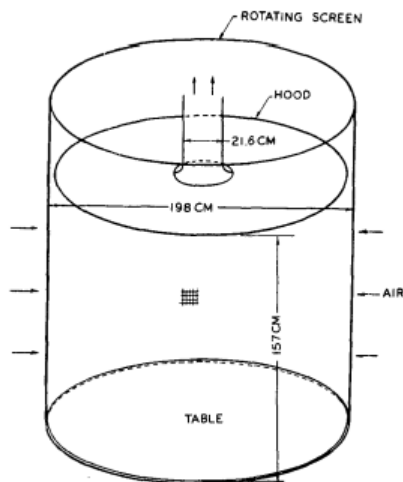


Рис. 1. Дослідна установка в Католицькому університеті Америки

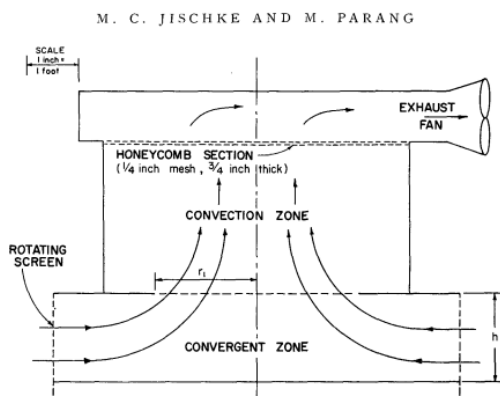


Рис. 2. Дослідна установка в Національній лабораторії руйнуючих бурь Університету штату Оклахома

Наступна робота, що була проведена в Національній лабораторії руйнуючих бурь Університету штату Оклахома (NSSL, Oklahoma University) надала великий поштовх на розвиток різноманітних конструкцій генераторів торнадо. Створена установка [4], також мала вентилятор для створення висхідного потоку і екран, що обертався з направляючими лопатками для створення циркуляції.

Наявність таких конструктивних відмінностей як наявність хонейкомба, більша висота конвективної зони і інш. Дозволили авторам вперше спостерігати цілий ряд притаманних природним торнадо явищ. Серед них – розподіл поверхневого тиску, геометрія воронки вихору та існування режимів, при яких формувалися два і більше вихорів [5] (рис. 3).

На базі наробок автора [4] в Департаменті метеорології університету Оклахома було

створено цілий ряд аналогічних за своєю конструкцією генераторів торнадоподібних структур. Так в [6] були змінені конструкція вихідного каналу.

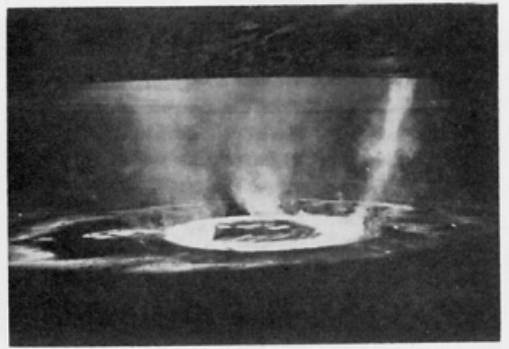


Рис. 3. Формування 2 і більше торнадо в Національній лабораторії руйнуючих бурь Університету штату Оклахома

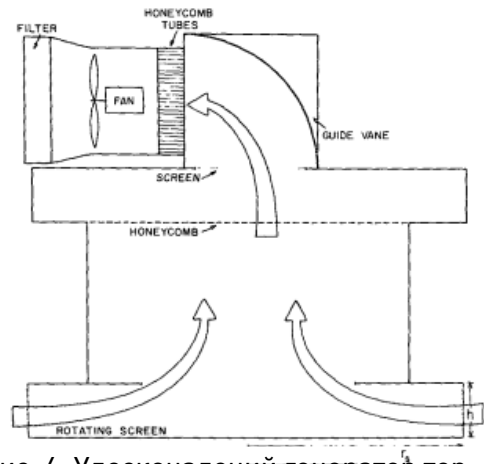


Рис. 4. Удосконалений генератор торнадо Університету штату Оклахома

В цьому дослідженні (рис. 4), з використанням методу термоанемометрії, було вивчено вплив шорховатості поверхні на величину критичного значення параметру закрутки, при якому відбувається перехід від генерації одновихрового до генерації багатовихрових структур (що складаються із двох, трьох і навіть чотирьох мініторнадо).

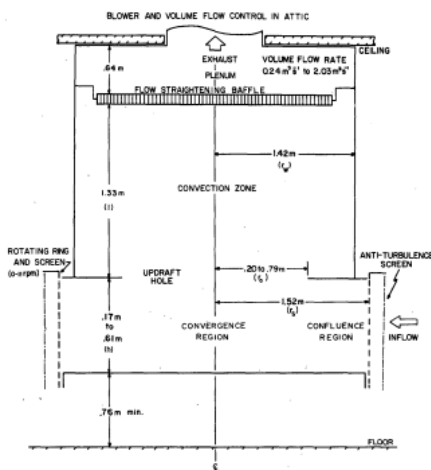


Рис. 5. Дослідна установка в Університеті Пердью штату Індіана

В роботах [7-10], що проводились в Університеті Пердью штату Індіана (Purdue University, Indiana) також використовувався генератор смерчеподібних вихорів аналогічної конструкції (рис. 5).

Відмінністю даного генератора є те, що всі основні геометричні (висота зони вхідного потоку, радіус вихідного отвору) і режимні (об'ємна витрата повітря, величина тангенціальної швидкості) параметри змінювались в дуже широкому діапазоні.

Метою цих досліджень було отримання максимально стаціонарних торнадо. З цією метою використовувались антитурбулентні на-

правляючі, що розташовувались на вході в генератор вихрових потоків. Така дослідна установка дозволяла моделювати різні типи вихрових потоків внаслідок широкого діапазону змінних вихідних параметрів (значення тангенціальної швидкості, витрата повітря).

В Метеорологічному відділенні Університету штату Каліфорнія (Department of Meteorology, University of California) вперше спробували відмовитись від використання вентилятора [11] при створенні висхідного потоку повітря (генерації торнадо). При проведенні цих досліджень по генерації вихрових структур автори спирались на механізм конвекції, а саме: використовувались алюмінієві пластини (з 20 віконцями, які були виконані з плексигласу), що піддавались нагріванню. Встановленні віконця були під різними кутами для надання закрутки формуючого повітряного потоку. Фіксація і заміри результатів (одного компонента швидкості і вертикального розподілу температури) вимірювань проводилися методом лазерної доплерівської анемометрії і термометрії. Отримані дослідні дані довели певну схожість процесів при вихрових повітряних потоках з попередніми роботами [8-10].

Ще одна робота по генерації торнадо в лабораторних умовах

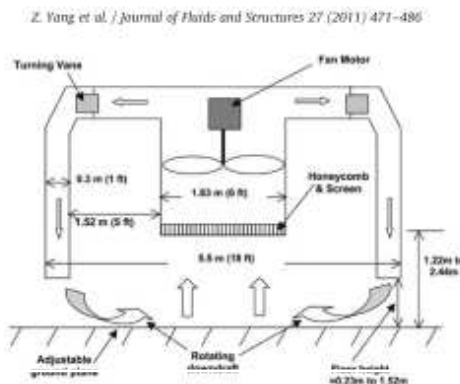


Рис. 6. Схема дослідної установки та її фото в Університеті штату Айови



[12-14], без обмежувачих стінок була проведена в Університеті штату Айови (Iowa State University). Для створення відповідної повітряної структури використовувався вентилятор і направляючі лопатки.

Установка (рис. 6) відрізнялась тим, що в ній вдалося згенерувати доволі крупні вихори (торнадо) в діаметрі до 1,12 м і висотою від 1,2 до 2,4 м, причому максимальне значення тангенціальної швидкості досягалося 14,5 м/с, а параметр закрутки 1,14. Візуалізація стержня торнадо відбувалося шляхом використання сухого льоду. Крім

відсутності обмежувачих бокових стінок генератор мав ще одну відмінність. Його кріплення було влаштовано на направляючих, що дозволяло його переміщення в просторі з лінійною швидкістю 0,8 м/с, а відповідно і повітряної вихрової структури. Таке переміщення зробило можливим вивчення його впливу на моделі будівель, що розташовувались на його шляху.

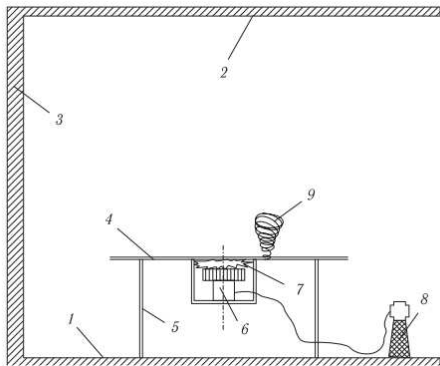


Рис. 7. Схема генератора торнадо-подібних вихорів, що не обмежується стінками, Вараксін А. Ю.

тури (мініторнадо), внаслідок створення нестійкої стратифікації повітря. Для візуалізації застосовувалось частки-трасери (магnezія мікрометрових розмірів, що наносилась тонким шаром на підстилаючу поверхню).

Таким чином, всі вище описані експериментальні роботи були присвячені лише для отримання або стаціонарних вихрових структур

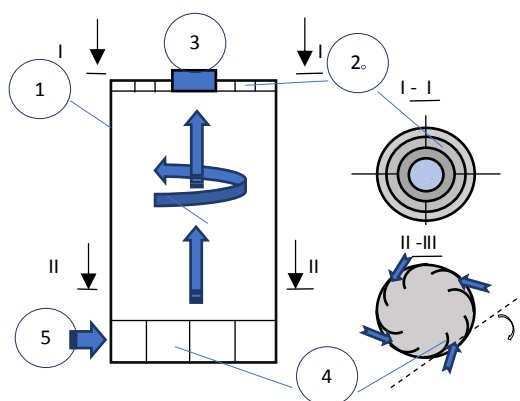


Рис. 8. Схема генератора торнадо-подібних вихорів (НУВГП): 1 – циліндр, 2 – заслінки по верхньому зрізу, 3 – вентилятор, 4 – направляючі притоку повітря, 5 – напрям руху повітря

Питанням генерації, вивчення властивостей і можливостями керування торнадо було присвячені дослідження [15]. Де експериментальна установка (рис 7) представляла собою стіл, в якості горизонтальної поверхні – лист алюмінію діаметром 1,1 м і товщиною 1,5 мм. Під столом розміщала газова горілка на пропаново-бутановій суміші з електропідпалюванням.

Після контрольованого нагріву поверхні алюмінію генерувались нестаціонарні вихрові структури

з використанням механічних закручуючих пристроїв (що при такій постановці задачі цілий ряд принципових питань вивчення торнадо залишався поза увагою), або вільних концентрованих нестаціонарних вихрових структур (що в свою чергу ускладнює вивчення внаслідок спонтанності виникнення, просторово-часової нестабільності і т.і.).

**Висновок.** Установка, що пропонується (рис. 8),



відштовхується від попередніх експериментів і в свою чергу, дозволить вивчити ряд фундаментальних характеристик вихрових структур (зміна температури, вологості, тиску по висоті вихрових потоків, їх зміна в часі, швидкість повітряних мас і розподіл по тілу торнадо цих параметрів).

Відповідні датчики розташовуються в середині установки із зміною висоти по тілу установки. Крім удосконалення математичних моделей складних повітряних процесів в тілі торнадо, на базі попередніх досліджень, що наведені, ми очікуємо певного перепаду температур в тілі вихору, тому дана установка може бути прообразом охолоджувальних установок в різноманітних галузях промисловості.

1. 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.
2. Ying S. J., Chang C. C. Exploratory model study of tornado-like vortex dynamics. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1970. V. 27, № 1. P. 3–14.
3. Wan C. A., Chang C. C. Measurement of the velocity field in a simulated tornado-like vortex using a three-dimensional velocity probe. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1972. V. 29, № 1. P. 116–127.
4. Ward N. B. The exploration of certain features of tornado dynamics using laboratory model. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1972. V. 29, № 9. P. 1194–1204.
5. Jischke M. C., Parang M. Properties of simulated tornado-like vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1974. V. 31, № 3. P. 506–512.
6. Leslie F. W. Surface roughness effects on suction vortex formation: a laboratory simulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1977. V. 34, № 7. P. 1022–1027.
7. 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.
8. Baker G., Church C. R. Measurements of core radii and peak velocities in modeled atmospheric vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1979. V. 36. P. 2413–2424.
9. Church C. R., Snow J. T. The dynamics of natural tornadoes as inferred from laboratory simulations. *J. Rech. Atmos.* 1979. V. 12. P. 111–133.
10. Snow J. T., Church C. R., Barnhart B. J. An investigation of the surface pressure fields beneath simulated tornado cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1980. V. 37. P. 1013–1025.
11. Fizjarrald D. E. A laboratory simulation of convective vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1973. V. 30, № 7. P. 894–902.
12. Gallus W. A., Sarkar P., Haan F., Kuai L., Kardell R., Wurman J. A translating tornado simulator for engineering tests: comparison of radar, numerical model, and simulator winds. *Proc. 22 Conf. on Severe Local Storms*. 2004. Paper 15.1.
13. Kuai L., Haan F. L., Gallus W. A., Sarkar P. P. CFD simulations of the flow field of a laboratory-simulated tornado for parameter sensitivity studies and comparison with field measurements. *Wind and Structures*. 2008. V. 11, № 2. P. 75–96.
14. 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. **15.** Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. Торнадо. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. 344 с.

## REFERENCES:

- 1.** Piralishvili Sh. A., Poliaev V. M., Serheev M. N. Vkhrevoi effekt. Eksperiment, teoriia, tekhnicheskie resheniia / pod red. A. I. Leonteva. M. : UNPTs «Enerhomash», 2000. 412 s.
- 2.** Ying S. J., Chang C. C. Exploratory model study of tornado-like vortex dynamics. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1970. V. 27, № 1. P. 3–14.
- 3.** Wan C. A., Chang C. C. Measurement of the velocity field in a simulated tornado-like vortex using a three-dimensional velocity probe. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1972. V. 29, № 1. P. 116–127.
- 4.** Ward N. B. The exploration of certain features of tornado dynamics using laboratory model. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1972. V. 29, № 9. P. 1194–1204.
- 5.** Jischke M. C., Parang M. Properties of simulated tornado-like vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1974. V. 31, № 3. P. 506–512.
- 6.** Leslie F. W. Surface roughness effects on suction vortex formation: a laboratory simulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1977. V. 34, № 7. P. 1022–1027.
- 7.** 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.
- 8.** Baker G., Church C. R. Measurements of core radii and peak velocities in modeled atmospheric vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1979. V. 36. P. 2413–2424.
- 9.** Church C. R., Snow J. T. The dynamics of natural tornadoes as inferred from laboratory simulations. *J. Rech. Atmos.* 1979. V. 12. P. 111–133.
- 10.** Snow J. T., Church C. R., Barnhart B. J. An investigation of the surface pressure fields beneath simulated tornado cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1980. V. 37. P. 1013–1025.
- 11.** Fizjarrald D. E. A laboratory simulation of convective vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1973. V. 30, № 7. P. 894–902.
- 12.** Gallus W. A., Sarkar P., Haan F., Kuai L., Kardell R., Wurman J. A translating tornado simulator for engineering tests: comparison of radar, numerical model, and simulator winds. *Proc. 22 Conf. on Severe Local Storms*. 2004. Paper 15.1.
- 13.** Kuai L., Haan F. L., Gallus W. A., Sarkar P. P. CFD simulations of the flow field of a laboratory-simulated tornado for parameter sensitivity studies and comparison with field measurements. *Wind and Structures*. 2008. V. 11, № 2. P. 75–96.
- 14.** 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.
- 15.** 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)

## **EXPERIMENTAL STUDY OF VORTEX AIR FLOWS**

**Vortical (or twisted) streams are extremely widespread in nature (atmospheric cyclones, sandstorms, air storms, typhoons, forest fires).**

**Modern laboratory studies simulating natural tornadoes can be divided into two categories:**

**walls limited by stationary air vortices, which are formed as a result of the use of fans, mechanical twisters (guides designed to create vortex streams, screw screws, internal spiral arms, etc.), as well as through the tangential nozzle of the medium and the intensive rotation of the body elements (pipes) [2-11]. The purpose of these studies was to obtain the most stationary tornadoes. Such experimental installation allowed to simulate different types of vortex flows due to a wide range of variable output parameters (tangential velocity, air flow).**

**Another principle is the creation of nonstationary vortical flows. In this case, after controlling the surface heating, nonstationary vortex structures (minitorno) were generated, due to the creation of unstable stratification of air. For visualization, trace particles were used (magnesia of micrometer size applied by a thin layer on the underlying surface).**

**The experimental work described was devoted only to obtaining or stationary vortex structures with the use of mechanical twisters (which, in this formulation of the task, a number of fundamental issues of studying the tornado remained out of focus), or free concentrated non-stationary vortical structures (which, in turn, complicates studying as a result of the spontaneity of occurrence, spatial-temporal instability, etc.).**

**The proposed installation rests on previous experiments and in turn allows us to study a number of fundamental characteristics of the vortex structures (change in temperature, humidity, pressure in the height of vortex flows, their change over time, air mass velocities, and the distribution of these parameters in the body of the tornado).**

**The appropriate sensors are located in the middle of the installation with a change in the height of the body of the installation. In addition**



**to improving the mathematical models of complex airborne processes in the body of the tornado, based on the previous studies, we expect a certain temperature difference in the vortex body, so this installation can be a prototype of cooling installations in various industries.**

**Keywords:** experiment, classification, vortex flows, tornado.

---

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

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ**

**Приведена классификация, характеристика, преимущества и недостатки экспериментальных установок по генерации вихревых потоков (торнадо). Изучен опыт и развитие современных экспериментальных подходов. На опыте существующего опыта предлагается новая модель, которая позволит более основательно подойти к изучению физических свойств вихревых воздушных структур.**

**Ключевые слова:** эксперимент, классификация, вихревые потоки, торнадо.

---