

УДК 533.6.08

Ластовець Н. В., асистент (Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова)

## **ТЕХНОЛОГІЇ ВИМІРЮВАННЯ КОНВЕКЦІЙНИХ ТЕЧІЙ В ПРИВІКОННІЙ ЗОНІ ОПАЛЮВАЛЬНИХ ПРИМІЩЕНЬ**

**У статті пропонується всебічний аналіз технологій вимірювання температури та швидкості руху повітря при дослідженні конвекційних течій в привіконній зоні опалювального приміщення. На підставі аналізу впровадження різних способів вимірювання робляться висновок про методи, що є оптимальними для даного випадку.**

**Ключові слова:** технології вимірювання газового потоку, термоанемометрія, конвекційні потоки в приміщенні.

Дослідження конвекційних потоків у приміщенні зумовлюються багатьма факторами: різницею температур на внутрішніх поверхнях, інфільтрацією повітря, роботою різноманітних систем опалення та ін.. Тому, безумовно, дослідження цих потоків є багатофакторною та неоднозначною задачею. Але відомо, що чим більш детальна інформація про поля температури та швидкості руху повітря є доступною, тим більш можливостей проектування керованих та енергозберігаючих систем є у інженера. Тому ця проблема, що досліджувалась шістдесят років тому, і досі є актуальною в епоху зростання потреб теплового комфорту а розвитку науково-технічного прогресу [1, 2]. Зокрема, конвекційні течії від холодних поверхонь досліджувались такими вченими, як Per Heiselberg [3, 4], Володимир Савін [5], Peng Shia-hui, Folke Peterson [6]. Отримані залежності та емпіричні формули можна легко використовувати в інженерній практиці через те, що вони вимагають небагато вхідних даних. Але усі результати таких досліджень строго пов'язані з конкретними умовами експериментів та відповідними емпіричними коефіцієнтами.

Останнім часом все більшого поширення набувають методи математичного моделювання гідродинаміки (CFD-коди). Не зважаючи на те, що на сьогоднішній день було зроблено багато досліджень впливу конструкції вікон [7], різних типів опалювальних приладів, що генерують природні [8, 9] та вимушені [10] конвекційні потоки, а також роботи датчиків параметрів мікроклімату в приміщенні [11-13], всі математичні моделі потребують перевірки на адекватність за допомогою

натурних експериментів.

Таким чином, аналізуючи приведені дослідження, можна зробити висновок про те, що на сьогодні жоден за сучасних методів дослідження конвекційних потоків у приміщенні не може обходитись без виконання певних вимірювань швидкості та температури повітря.

Методи вимірювання температури є достатньо розвинутими. В той же час, методи вимірювання швидкості повітря є складними та неоднозначними. Точне вимірювання швидкості внутрішнього повітря швидкість не є простою задачею, так як середня швидкість руху повітря в приміщенні є низькою (0...1 м/с), а інтенсивність турбулентності – високою (>10%). Технічні характеристики найбільш доступних вимірювачів швидкості є обмеженими для вимірювання потоку внутрішнього повітря, в тому числі конвекційних потоків в привіконній зоні. В приміщеннях з механічною вентиляцією виявлені більш високі середні швидкості руху повітря, але інтенсивності турбулентності залишалися приблизно однаковими (0,05-0,40 м/с; 10-70% проти 0-0,20 м/с; 10-60%).

Турбулентність потоків повітря у приміщення зумовлює залежність від часу швидкості повітря, що вимірюється в конкретному місці. Якщо анемометр має час відклику менш, ніж 100 мс, він може вимірювати миттєві з допустимою точністю, та такі статистичні дані можуть бути обчисленими залежно від часу:

Середня швидкість:

$$\bar{v} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt. \quad (1)$$

Стандартне відхилення:

$$\sigma = \frac{1}{t_2 - t_1} \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} [v(t) - \bar{v}]^2 dt}. \quad (2)$$

Інтенсивність турбулентності:

$$Tv = \frac{\sigma}{v}. \quad (3)$$

Найбільш численні експериментальні дослідження конвекційних потоків у приміщенні були досліджені такими вченими, як Шепелев И. А. [14], Меликов А. К. [15], Thorsauge J. [16], Hanzawa H. [17] та іншими. Вимірювання проводились у різних типах приміщень (кліматичні камери, вітальні, офісні приміщення, театри та ін.) на чотирьох різних

висотах робочої зони. Основний висновок цих досліджень полягає в тому, що середня швидкість руху повітря та турбулентні характеристики широко варіюються в межах робочої зони різних приміщень. Незважаючи на широкий спектр цих досліджень, отримані результати не є достатніми в якості відправної точки для чисельної перевірки через обмеженість інформації про граничні умови і експериментальні дані.

Зональне уявлення про зональне розподілення температур та швидкостей дозволяє отримати первинну інформацію ще до проведення вимірювань, що скорочує час та коштовність вимірювань, та спрощує відповідну обробку результатів.

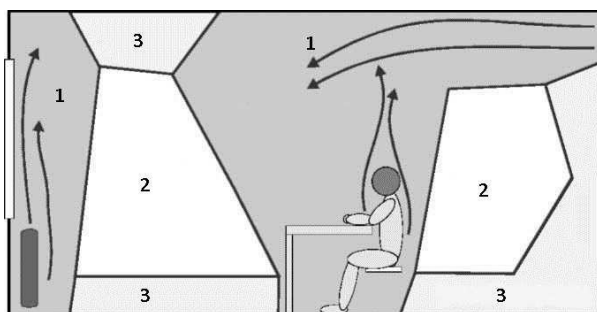


Рис. 1. Графічне представлення розподілення зон у приміщенні, стосовно переважаючому режиму потоку [18]:

1 – зона конвекційних потоків, 2 – вільна зона, що визначається, як різниця між конвекційною і граничною зонами; 3 – гранична зона

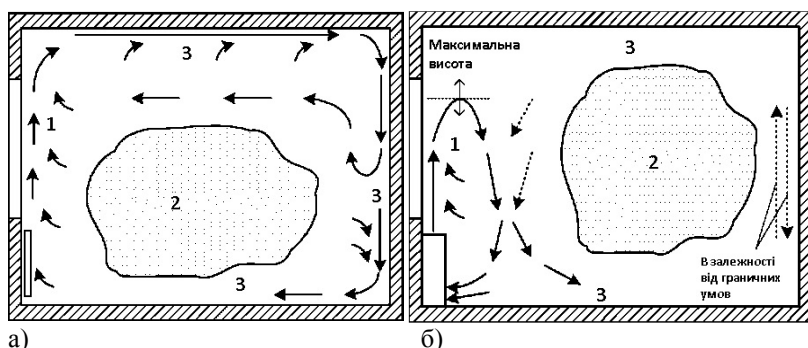


Рис. 2. Схема повітряних потоків у приміщенні, що а) охолоджується та б) опалюється вентиляторним конвектором [19] (див. позначення рис. 1)

Таблиця 1

Оцінка характеристик потоку повітря по зонах, що вимірювалися у приміщеннях (Масштаб 1:1) [18]

Параметри	Зона колекційних потоків (1)	Вільна зона (2)	Гранична зона (3)
Середня швидкість ( $\bar{V}$ ) м/с	0,1-2,0	0,05-0,3	0,0-0,15
Інтенсивність турбулентності ( $Tv$ ) %	5-25	10-30	від 10-15 до 100
Частотна область( $f$ ) Гц	0-15	0-10	0-5
Інтегральний масштаб турбулентності ( $L_s^{int}$ ) м	–	–	0,05-0,2

Існуючі сучасні методи вимірювання та аналізу швидкості руху повітря [17] можна розділити на:

- *Методи візуалізації* (наприклад, потоками диму, інтерферографи) – ці методи роблять весь потік видимим для людського ока та наочним для дослідження. Візуалізація часто використовується також і для оцінки результатів, отриманих іншими методами. Із записаних образів структури візуалізації потоку можна отримати кількісну інформацію. Вектор швидкості може бути визначено шляхом візуалізації малих трасуючих частинок, які переносяться потоком. За допомогою цієї можна вимірювати дуже низькі швидкості в двох або в трьох вимірах.

- *Методи теплопередачі* (теплові анемометри) – ці методи засновані на передачу теплової енергії від джерела тепла до газу. Кількість переданої енергії є мірою швидкості потоку. Перевагами термоанемометрів є малі розміри, мала інерційність і велика чутливість. У зв'язку з цим термоанемометри застосовують при вимірюванні малих швидкостей, поблизу твердих стінок, змінних в часі швидкостей, тобто у випадках, коли вимірювання іншими способами веде до великих похибок. Особливого значення набувають термоанемометри при вимірюванні турбулентних пульсацій, будучи, власне кажучи, основним приладом для вимірювання в даних умовах. Чутливість термоанемометрів постійній різниці температур збільшується із зменшенням швидкості руху повітря (до 0,05 – 0,5 м/с). Але зонд прибору не має певного напрямлення, що може викликати похибку до 10-20%. Тому існує необхідність регулярного калібрування. Діапазон вимірювань – 0,1 до 25 м/с.

- *Метод часу прольоту* (акустичний анемометр і метод вимірюван-

ня швидкості за відображенням частинок (Particle-Image-Velocimetry) – в цих методах вимірюється часовий переміщення частинок протягом проміжку часу. У якості елементів, рух яких фіксується, можуть виступати звукові імпульси, теплові імпульси, іон. Діапазон вимірювань – 0,05-30 м/с.

- *Метод кінетичної енергії* (пневматичні трубки і чашкові анемометри) – кінетична енергія перетворюється в різницю тисків, яка є мірою швидкості рідини. Діапазон вимірювань – 1-20 м/с (чашковий анемометр), 2-30 м/с (пневматичні трубки)

- *Методи, засновані на ефекті Доплера* (лазерні вимірювачі швидкості) – швидкості руху повітря визначаються через зміни (світлових) хвиль через рідину. Хвилі частинок, що розсіюються в рідині, викликають зсув частоти (доплерівський зсув) випромінюваної хвилі. На сьогоднішній день, лазерні анемометри дають найбільш точну та достовірну інформацію про модуль швидкості та турбулентні характеристики потоку в одному або в декількох напрямках. Однак, будучи надійним методом вимірювання, цей метод є точним і вимагає значних інвестицій, тому не дуже підходить для тривалих вимірювань конвекційних потоків у приміщенні. Діапазон вимірювань – 5-50 м/с.

Численними авторами [20–22] були сформульовані основні вимоги, щодо вимірювання конвекційних потоків у приміщенні, такі, як частотний діапазон і чутливість (до температури і вологості), механічні або термічні переривання потоку. Також були зроблені висновки щодо застосування різних методів для вимірювання повітряного потоку в приміщеннях [23].

Виходячи з аналізу існуючих методів, можна зробити висновок, що тільки два метода можуть застосовуватися як для вимірювання та оцінки конвекційних потоків в привіконній зоні опалювальних приміщень: методи термоанеметрії та візуалізації газових потоків. За допомогою візуалізації потоків можна дізнатися про направлення потоку, а термоанемометром можна легко та з допустимою точністю замірити як температуру, так і швидкість руху повітря.

1. Fanger P. O. (1973), Thermal Comfort. McGraw-Hill Book Co. : New York. – 244 p. 2. Olesen B. W. and Parsons K. C. (2002) Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730 // Energy and Buildings. – Vol. 34 (6). 3. Heiselberg P. (1994) Draught Risk from Cold Vertical Surfaces // Building and Environment. – № 29 – P. 297–301. 4. Heiselberg P., Overby H. and Bjorn E. (1995) Energy-efficient measures to avoid downdraft from large glazed facades // ASHRAE Transactions. – № 101(2). – P. 1127–1135. 5. Дроздов В. А., Савин В. К., Александров Ю. П. Теплообмен в светопрозрачных ограждающих конструкциях, М. : Стройиздат, 1979. – 307 с. 6. Shia-hui P., Folke P.,

- Convection from a cold window with simulated floor heating by means of a transiently heated flat unit // *Energy & Buildings*, 1995. – №23 (2). – P. 95–103.
7. Huizenga C., Zhang H., Mattelaer P., Yu T., Arens E. and Lyons P. (2006) Window Performance for Human Thermal Comfort // Final Report to the NFRC.
8. Oosthuizen P. (2009) A numerical study of the effect of a below-window convective heater on the heat transfer rate from a cold recessed window // *Chemical Engineering Transactions*. – №18. – P. 81–86.
9. Jurelionis A., Edmundas I. (2008) CFD predictions of indoor air movement induced by cold window surfaces // *Civil Engineering and Management*. – Vol. 14(1). – P. 29–38.
10. Awbi H. B. and Hatton A. (2000) Mixed convection from heated room surfaces // *Energy and Buildings*. – №32. – P. 153–166.
11. Gendelis S., Jakovičs A. (2006) Mathematical Modelling of Living Room with Different Types of Heating and Pressure Conditions // Proceedings of the 4th WSEAS Int. Conf. on HEAT TRANSFER, THERMAL ENGINEERING and ENVIRONMENT, Elounda, Greece, August 21-23. – P. 248–253.
12. Дацюк Т. А., Ивлев Ю. П., Пухкал В. А. Результаты моделирования микроклимата жилых помещений при различных типах отопительных приборов // *Инженерно-строительный журнал*, 2013. – № 6(41). – С. 12–21.
13. Дячек П. И. Моделирование микроклимата отапливаемых помещений / П. И. Дячек, А. Э. Захаревич // *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ - Энергетика : научно-технический и производственный журнал*. – 2009. – № 2. – С. 34–47.
14. Шепелев И. А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. – М. : Стройиздат, 1978. – 144 с.
15. Melikov A. K., Hanzawa H. and Fanger P. O. (1988) Airflow characteristics in the occupied zone of heated spaces without mechanical ventilation // *ASHRAE Transactions*. – Vol. 94 (1). – P. 52–70.
16. Thorsauge J. (1982) Air-velocity fluctuations in the occupied zone of ventilated spaces // *ASHRAE Transactions*. – Vol. 88(2). – P. 753–764.
17. Hanzawa H., Melikov A. K. and Fanger P. O. (1987) Airflow characteristics in the occupied zone of ventilated spaces // *ASHRAE Transactions*. – Vol. 93(1). – P. 524–539.
18. Loomans M. G. L. C. and Mook F. J. R. (1995). Survey on measuring indoor airflows // FAGO-report 95.25.W, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands.
19. Riederer P., Marchio D., Visier J. C. (2002) Influence of sensor position in building thermal control: criteria for zone models // Elsevier, *Energy and Buildings*. – №34. – P. 785–798.
20. Loomans M. G. L. C. (1998) The measurement and simulation of indoor air flow // Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven. ((Co-)promot. : prof. ir. P. G. S. Rutten, prof. ir. J. A. Wisse & Q. Chen).
21. Fingerson L. M. and Freymuth P. (1983) Thermal anemometers // In: *Fluid Mechanics Measurements* (ed: R. J. Goldstein), Chapter 4, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, USA.
22. Tavoularis S. (1986) Techniques for turbulence measurement // In: *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, volume 1: Flow Phenomena and Measurement (ed: N. P. Chermisinoff), Chapter 36, Gulf Publishing Company, Houston, USA.
23. Ярин Л. П., Генкин А. Л., Кукек В. И. Термоанемометрия газовых потоков. – Л. : Машиностроение, 1983. – 198 с.

Рецензент: д.т.н., професор Капцов І. І. (ХНУМГ ім О.М. Бекетова)

---

**Lastovets N. V., Assistant** (Kharkiv National University of Municipal Economy O. Beketova)

### **THE MEASURING TECHNIQUES OF CONVECTIVE FLOWS IN THE NEAR WINDOW ZONE OF HEATED ROOMS**

**The comprehensive review of temperature and velocity measuring techniques in research of convective flows in the near window zone is treated in the article. The conclusion concerning optimal measuring methods is based on the literature analysis of various measurement techniques implementation.**

**Keywords:** gas flow measuring techniques, thermoanemometry, indoor convective flows.

---

**Ластовец Н. В., ассистент** (Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова)

### **ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ В ПРИКОННОЙ ЗОНЕ ОТАПЛИВАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЙ**

**В статье предлагается всесторонний анализ технологий измерения температуры и скорости движения воздуха при исследовании конвективных потоков в приконной зоне отапливаемого помещения. На основании анализа внедрений различных способов измерения делаются вывод о методах, которые являются оптимальными для данного случая.**

**Ключевые слова:** технологии измерения газового потока, термоанемометрия, конвективные потоки в помещении.

---