

УДК 697.1:536.25

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОНВЕКЦІЙНИХ ТЕЧІЙ  
В ПРИВІКОННІЙ ЗОНІ ОПАЛЮВАЛЬНИХ ПРИМІЩЕНЬ**

О. В. Ромашко, Н. В. Ластовець

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ  
В ПРИОКОННОЙ ЗОНЕ ОТАПЛИВАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЙ**

А. В. Ромашко, Н. В. Ластовець

**THE ANALYSES OF CONVECTIVE JETS INTERACTIONS  
NEAR WINDOW ZONES IN HEATING ROOMS**

A. Romashko, N. Lastovets

*Розглянуто основні особливості аналітичних, чисельних та експериментальних досліджень конвекційних потоків в привіконній зоні опалювальних приміщень. Наведені рекомендації проведення даних досліджень. Встановлена максимальна кількість експериментів із аеродинаміки і з тепломасообміну.*

*Встановлено сукупність значень швидкостей повітряного потоку близько внутрішніх поверхонь зовнішніх огорожень, яка дозволяє судити про швидкість пристінного повітряної течії на різних рівнях по висоті, про взаємодію нагрітих і охолоджених повітряних потоків, про товщину граничного шару по висоті огорож.*

**Ключові слова:** конвекційні потоки, привіконна зона, швидкість повітряного потоку, граничний шар, тепломасообмін.

*Рассмотрены основные особенности аналитических, численных и экспериментальных исследований конвекционных потоков в приоконной зоны отапливаемых помещений. Приведенные рекомендации проведения данных исследований. Установлено максимальное количество экспериментов по аэродинамике и по тепло массообмена.*

*Установлена совокупность значений скоростей воздушного потока около внутренних поверхностей наружных ограждений, которая позволяет судить о скорости пристеночного воздушного потока на разных уровнях по высоте, о взаимодействии нагретых и охлажденных воздушных потоков, о толщине граничного слоя по высоте ограждений.*

**Ключевые слова:** конвекционные потоки, приоконная зона, скорость воздушного потока, граничный слой, тепло массообмен.

*The main features of the analytical, numerical and experimental studies of convection currents in the area pryvikonnoyi heated space. Resulted recommends conducting these studies. Set a maximum number of experiments in aerodynamics and heat mass transfer.*

*Established set of values of the velocity of the air flow around the inner surfaces of the outer fences, which gives an indication of the rate of air flow wall at different height levels, the interaction of heated and cooled air flows, the thickness of the boundary layer height fences.*

**Keywords:** convection currents, window area, air velocity, boundary layer, heat mass transfer .

Малий термічний опір вікон і низька температура внутрішньої поверхні викликають появу холодних мас повітря, які, проникаючи в робочу зону, знижують її температуру і збільшують рухливість повітря (рис. 1). В найбільш холодні періоди зими у віконного скління температура знижується на кілька градусів, а швидкість охолоджених повітряних струменів на рівні підвіконня становить близько 0,3 м/с (при висоті скління до 2,0 м).

Крім того, поверхня тіла людини, що знаходиться біля вікна, через негативну радіацію втрачає певну кількість тепла. Установлення внизу вікон опалювальних приладів конвекційного типу дає можливість локалізувати спадні потоки повітря і попередити радіаційне переохолодження.

Температура на внутрішній поверхні скління  $\tau_B$  при заданій різниці температур  $(t_B - t_H)$  залежить від опору теплопередачі огороження  $R_0$ , а також коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_B$  на внутрішній поверхні огороження:

$$\tau_B = t_B - \frac{t_B - t_H}{R_0 \alpha_B} \quad (1)$$

Підвищити температуру внутрішньої поверхні світлопрозорої конструкції можна збільшенням: температури внутрішнього повітря у скління, опору теплопередачі конструкції, коефіцієнта тепловіддачі біля внутрішньої поверхні. Підвищити термічний опір світлопрозорої конструкції до потрібних меж можна шляхом введення в конструкцію нових шарів скління і збільшення числа повітряних прошарків. Однак слід мати на увазі, що збільшення шарів скління веде до зниження світлової активності. Світлопрозорі конструкції з коефіцієнтом світлопропускання нижче 0,7 стають неефективними вже при числі шарів скління більше трьох. Оскільки коефіцієнт тепловіддачі у внутрішній поверхні огороження складається з конвекційної і променистої складової, то шляхом обдування внутрішніх поверхонь огороження струменями повітря можна впливати на конвекційну складову  $\alpha_B$ . Опромінення світлопрозорих конструкцій інфрачервоними джерелами тепла підвищує променисту складову коефіцієнта тепловіддачі. Однак вікна зручніше захищати плоскими напівобмеженими струменями повітря.

Для боротьби з холодними струмами повітря під вікнами над холодними поверхнями розташовують опалювальні прилади, які в залежності від типу, генерують струмені вільної або вимушеної конвекції. Найменшу температуру теплоносія можна досягти в опалювальних приладах, що генерують примусовий конвекційний струмінь (наприклад, вентиляторні довідники - фанкойли).

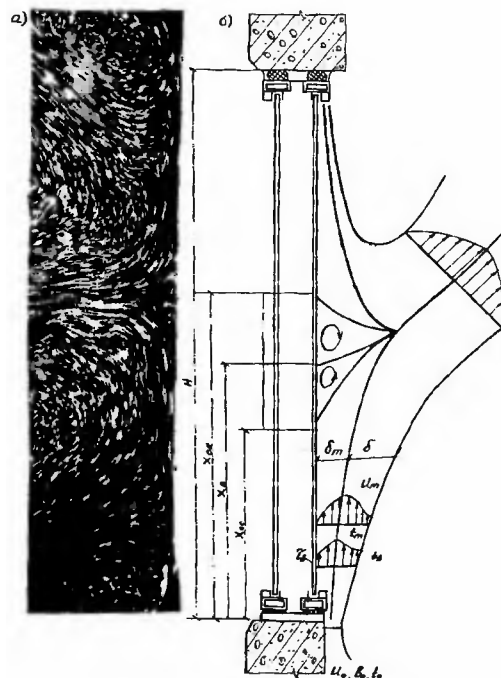


Рис. 1. Лінії струму у скління і схема руху повітря при взаємодії спадного потоку і напівобмеженого струменя

Серед методів дослідження взаємодії конвекційних течій можна назвати такі:

- аналітичні методи,
- чисельні методи,
- експериментальні методи.

Аналітичними методами дослідження взаємодій конвекційних течій в приміщенні в нашій країні займалися В. К. Савін і В. А. Дроздов [1], Н. С. Давидова, П. Н. Умняков [2], В. Н. Богословський [3, 4, 5]. Однак, незважаючи на велике практичне застосування інженерних задач накладання і взаємодії вентиляційних та теплових струменів, вони описані недостатньо, в основному для високого скління.

Струмінь теплового повітря, що піднімається вгору, інтенсивно обмінюється теплотою з внутрішньою поверхнею скління, що призводить до великих втрат теплоти, але одночасно підвищується температура на внутрішній поверхні скління і, отже, зменшується вплив радіаційного охолодження. Температура результуючого потоку часто виходить нижча за комфортну, тому небажано, щоб він був спрямований вниз. Для цього потрібно намагатися, щоб в точці зустрічі імпульс припливного струменя дорівнював імпульсу конвекційного спадного потоку.

Обидва ці імпульси визначаються розрахунковим методом. Зустріч спадного потоку з напівобмеженим струменем відбувається в тому місці, де їх осьові (максимальні) швидкості дорівнюють одна одній ( $u_{ст} = u_k$ ). Для того, щоб вісь результуючого струменя була спрямована перпендикулярно або під деяким кутом вгору до захисної конструкції, необхідно в місці зустрічі струменів виконати умову:  $\delta_{ст} \geq \delta_k$ , тобто відношення товщин граничного шару конвекційного і напівобмеженого струменів повинне бути менше або дорівнювати одиниці. Ця умова в першому наближенні означає, що кількість руху напівобмеженого струменя більша або дорівнює кількості руху струменя, обумовленого вільною конвекцією:  $\frac{\delta_{ст}}{\delta_k} = 1$ . Використовуючи залежності  $\delta_{ст} = 0,22b$  та  $\delta_k = 0,34(t_B - \tau_B)^{-\frac{1}{6}}(H - h_{зустр.})^{0,5}$  [1], можна записати:

$$\frac{0,34(t_B - \tau_B)^{-\frac{1}{6}}(H - h_{зустр.})^{0,5}}{0,22b} = 1, \text{ звідки:}$$

$$h_{зустр.} = 1,2(t_B - \tau_B)^{-0,33}[(1 + 1,67(t_B - \tau_B)^{0,33}H)^{0,5} - 1], \quad (2)$$

де  $(t_B - \tau_B)$  – різниця між температурою приміщення і температурою поверхні визначається у першому наближенні;  
 $H$  – висота огороження,  
 $b$  – ширина повітрярозподільної щілини.  
 Координату відриву струменю від стінки визначають:

$$h_{в.с} = 27u_0b_0/(t_B - \tau_B) \quad (3)$$

Своє логічне продовження дослідження теплопередачі вікон з урахуванням впливу конвекційних струменів від нагрівальних приладів отримали в роботі Н. С. Давидової. Нею відзначено, що тепловтрати вікон без підвіконників при наявності нагрівальних приладів у середньому збільшуються при одношаровому склінні на 55-60 %, при подвійному – на 20 %, при тришаровому – на 10 %. При наявності підвіконня теплофізична картина течії повітря біля вікна змінюється, і тепловтрати зменшуються.

Чисельні методи дослідження основані на загальних диференціальних рівняннях гідроаеромеханіки і тепломасопереносу. На відміну від інженерних розрахунків методи дозволяють отримати детальну і достатньо точну інформацію про поля досліджуваних параметрів. На початок нашого століття розроблені різноманітні комірцеві програми для рішення задач прикладної обчислювальної гідродинаміки (CFD- коди – Computational Fluid Dynamics) – Fluent, Ansys CFX, Star CD, Comsol Multiphysics, Flow Term, Flow Vision, Coolit та інші. За кордоном математичне моделювання руху повітряних потоків і супутнього тепломасообміну широко застосовується як важливий етап передпроектних розробок і проектування систем кліматизації. Однак, незважаючи на відомий процес, досягнутий у цій галузі, застосування цих методів для опалювальної та вентиляційної техніки обмежене. Це пояснюється обчислювальними труднощами вирішення практичних завдань через різноманіття фізичних процесів, що відбуваються в системах опалення та вентиляції.

Суттєвого зменшення обчислювальних витрат можна домогтися також за рахунок обліку

геометричної специфіки завдань вентиляції та охолодження електронної апаратури, зокрема, тієї обставини, що більшість об'єктів, які зустрічаються в таких завданнях, при всьому своєму різноманітті мають форму прямокутних паралелепіпедів або близьку до неї. Це дозволяє уникнути необхідності використання неструктурованих сіток, без яких навряд чи можливе створення програм, які претендують на опис довільних геометричних об'єктів, і, тим самим, значно скоротити як витрати пам'яті, так і час рішення задачі. При цьому оптимальне рішення задачі може бути знайдено лише на основі розумного компромісу між повнотою математичної моделі, покладеної в основу програми, та її обчислювальною ефективністю.

Одним із варіантів такого рішення є спільне використання програмних засобів. Останні версії таких наукових обчислювальних засобів, як Matlab з використанням Simulink і Comsol, дозволяють вирішувати завдання розподілу температури і швидкості руху повітря в межах одного обчислювального середовища [11].

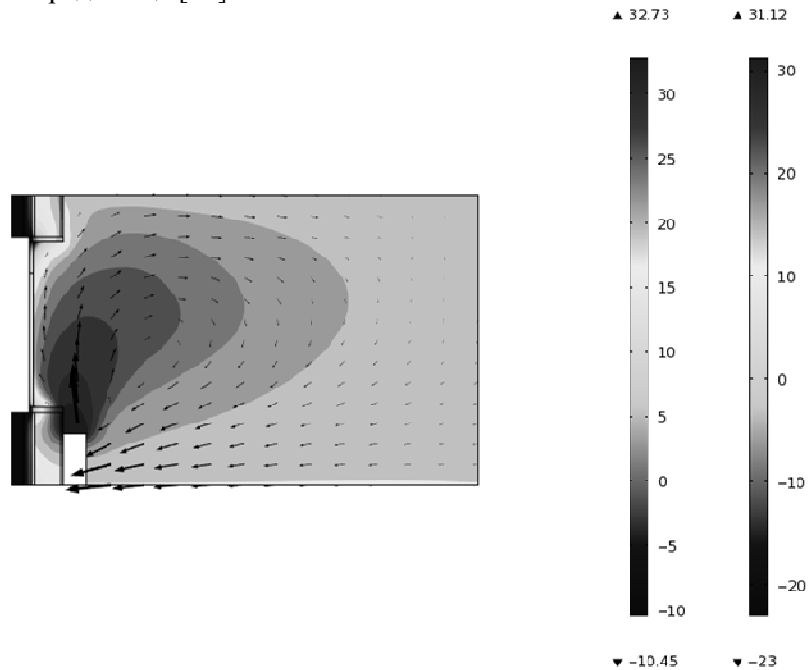


Рис. 2. Розподіл температури і структура потоку повітря в приміщенні

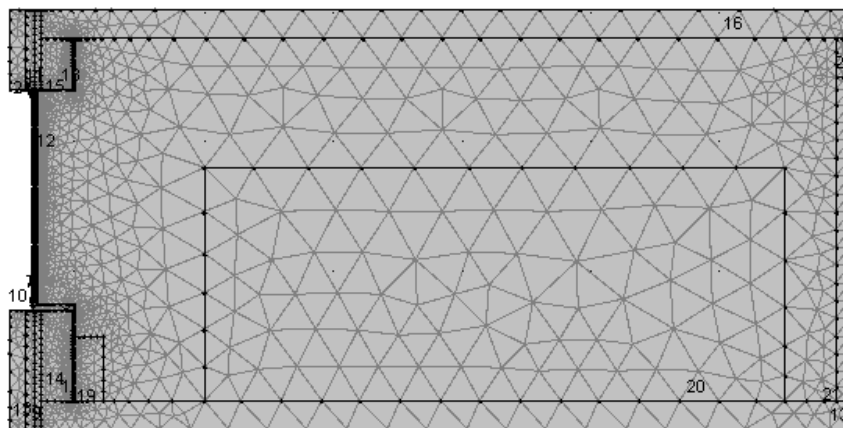


Рис. 3. Розрахункова скінченно-елементна сітка

У даному огляді не розглянуті докладно методи фізичного моделювання, що застосовуються, в основному, у виробничих приміщеннях. Існують також безконтактні методи аналізу температурних і швидкісних полів – методи інтерферометрії і тепловізornoї термографії [6, 7]. Ці методи дозволяють візуалізувати поля температур і отримати картину течії в цілому. Однак для вивчення конвекційних течій, особливо їх взаємодії, точності цих методів не вистачає.

Експериментальні методи дослідження, що передбачають методи планування експерименту [8], методи вимірювання параметрів та методи обробки та оцінювання отриманих

результатів [9], є необхідною частиною усіх вищезазначених методів. Це пояснюється тим, що основні рівняння та залежності гідродинаміки не мають на сьогоднішній день однозначних аналітичних рішень. Але визнаними методами планування експериментів та математичними методами обробки експериментальних даних можна одержати певні залежності для певних випадків.

Традиційні методи експериментальних досліджень [8] передбачають, як правило, встановлення однофакторної залежності  $y = f(x)$  при деякому постійному значенні решти факторів, для чого потрібно, не рахуючи повторень, провести не менше 4 ... 5 дослідів. При великій кількості первинних факторів, що впливають на шуканий параметр, число дослідів різко зростає. Якщо кожному з факторів задавати  $n$  рівнів, то число дослідів  $N = n^k$  виходить таким, провести які не завжди виявляється можливим. При плануванні за схемою повного факторного експерименту реалізуються всі можливі комбінації факторів на всіх обраних для дослідження рівнях. Якщо експерименти проводяться тільки на двох рівнях, при двох значеннях факторів і при цьому в процесі експерименту здійснюються всі можливі комбінації з  $k$  факторів, то постановка досвіду за таким планом називається повним факторним експериментом типу  $2^k$ . Рівні факторів являють собою межі досліджуваної області за досліджуванним технологічним параметром.

Однак жоден метод аналізу швидкісних і температурних полів в приміщенні є неможливим без проведення певних вимірювань з необхідною точністю. Швидкість руху повітря при природній конвекції зазвичай набагато менша за величиною, ніж в аналогічних випадках при примусовій конвекції. Крім того, вимірювання швидкості часто ускладнюється присутністю поля температури або концентрації, що створює течію. Оскільки швидкості малі, то градієнти тиску також дуже малі, і методи, основані на вимірюванні різниці тисків, наприклад за допомогою трубки Піто або трубки Прандтля, не забезпечують необхідну точність.

Сукупність значень швидкостей повітряного потоку близько внутрішніх поверхонь зовнішніх огорожень, визначена за допомогою термоанемометра, дозволяє судити про швидкість пристінної повітряної течії на різних рівнях по висоті, про взаємодію нагрітих і охолоджених повітряних потоків, про товщину граничного шару по висоті огорож. Термоанемометр дуже широко застосовується для вимірювання швидкості в різних умовах перебігу. Принцип його заснований на тепловіддачі від нагрітого дроту. Тепловіддача від дроту крім рівня температури і фізичних властивостей рідини залежить ще від швидкості течії. При вимірюванні температури чутливий елемент термоанемометра діє як джерело тепла і створює над собою висхідний факел. При великих швидкостях зовнішньої течії за елементом цей висхідний конвекційний потік не дає помітного внеску в механізм теплообміну. Але при швидкостях, що виникають зазвичай при природній конвекції, обидва ефекти часто можна порівняти один з одним, і чутливий елемент дає енергію шляхом змішаної конвекції. При вимірюванні швидкості поблизу межі граничного шару, де нормальна компонента порівняна за величиною з тангенціальною, необхідно враховувати орієнтацію потоку щодо висхідної течії, створюваної елементом. Тарування в потоці, паралельному течії в факелі від чутливого елемента (дроту), допустиме лише при дослідженні вертикальних природно-конвекційних течій. Тарувальні криві для термоанемометрів наводяться в паспортних даних і в довідниках. Поле температури, яке завжди існує в процесі теплообміну в умовах природної конвекції, також ускладнює вимірювання, оскільки тепловіддача від нагрітого дроту змінюється зі зміною температури рідини. Коли нагрітий дріт перетинає граничний шар, температура рідини змінюється, і це породжує сигнал, який необхідно відрізнити від сигналу, обумовленого швидкістю. Зміна температури рідини призводить до зміни її фізичних властивостей, що також може вплинути на сигнал датчика. Для компенсації зміни температури необхідно проводити тарування в розглянутому інтервалі температур, вимірювати температуру одночасно зі швидкістю і використовувати тарувальну криву для даної температури рідини.

При постановці експериментів із знаходження температурних і швидкісних полів біля внутрішніх поверхонь зовнішніх огорожень, основними критеріями на початковій ділянці розвитку конвекційного струменя є критерії  $Pr$  і  $Gr$ . Із віддаленням від передньої кромки вниз по потоку поступово зростає роль критерію  $Re$ . Таким чином, максимальна кількість експериментів не повинно перевищувати чотирьох із аеродинаміки і з тепло масообміну, відповідно.

**Висновки**

Маючи на увазі складність і багатофакторність задачі накладення конвекційних і теплових струменів в привіконній зоні опалювального приміщення, необхідний комплекс методів і підходів, що включає в себе:

1. Аналітичні дослідження фізики потоків, основані на співвідношеннях кількості руху напівобмеженого струменя і кількості руху спадного конвекційного потоку.
2. Математичне моделювання з урахуванням можливих припущень із застосуванням як граничні умови прилипання і непроникність для потоку повітря.
3. Експериментальні дослідження та методи візуалізації з урахуванням особливостей розв'язуваної задачі.
4. Статистичні методи обробки результатів експерименту з визначенням критерію оптимізації – мінімального енергоспоживання при дотриманні умов комфортності.

**Використана література**

1. Дроздов В. А. Теплообмен в светопрозрачных ограждающих конструкциях / В. А. Дроздов, В. К. Савин, Ю. П. Александров. – М.: Стройиздат, 1979. – 307 с.
2. Умняков П. Н. Теплоизоляция ограждающих конструкций жилых и общественных зданий / П. Н. Умняков – М.: Стройиздат, 1978. – 160 с.
3. Богословский В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). Учебник для вузов / В. Н. Богословский. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.
4. Богословский В. Н. Тепловой режим здания / В. Н. Богословский. – М.: Стройиздат, 1979. – 248 с.
5. Богословский В. Н. Отопление: Учеб. для вузов / В. Н. Богословский, А. Н. Сканава. – М.: Стройиздат, 1991. – 735 с.
6. Савин В. К. Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение / Савин В. К. – М., "Лазурь", 2005. – 432 с.
7. Дроздов В. А. Термография в строительстве / Дроздов В. А., Сухарев В. И. – М.: Стройиздат, 1987 – 238 с.
8. Дмитриева Л. С. Планирование эксперимента в вентиляции и кондиционировании воздуха / Дмитриева Л. С., Кузьмин А. В. – Иркутск: РШИ, 1984. – 210 с.
9. Ярин Л.П. Термоанемометрия газовых потоков / Л. П. Ярин, А. Л. Генкин, В. И. Кукес. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 198 с.

**Ромашко Олександр Васильович** – к. т. н., доцент кафедри експлуатації газових і теплових систем Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова.

**Ластовець Наталя Володимирівна** – асистент кафедри експлуатації газових і теплових систем Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова.

**Ромашко Олександр Васильевич** – к. т. н., доцент кафедри експлуатації газових і теплових систем Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова.

**Ластовець Наталья Владимировна** – асистент кафедри експлуатації газових і теплових систем Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова.

**Romashko Alexander** – PhD, Docent department of exploitation of gas and heating systems Kharkiv National University Urban Economy A. Beketova.

**Lastovets Natalia** – Assistant department of exploitation of gas and heating systems Kharkiv National University Urban Economy A. Beketova.