

## АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАКРОСТРУКТУРИ СТРУМИННИХ ТЕЧІЙ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ ПОВІТРОРОЗПОДІЛЕННЯ

*Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна*

*Запропоновано підхід до наближеного аналітичного опису турбулентних вентиляційних струменів шляхом геометричного аналізу макроструктури струминного прикордонного шару без використання експериментальних коефіцієнтів, понять «турбулентна в'язкість» і «турбулентний число Прандтля». На першому етапі досліджено струменя різних типів і показано відповідність розрахункових і експериментальних даних.*

**Постановка проблеми.** Одним з напрямків наукової діяльності кафедри теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури є розробка енергоефективних способів повітророзподілення у приміщеннях різного призначення. Серед останніх розробок відзначимо повітророзподільники ежекційні тангенціальні (ПЕТ), які утворюють струмини, що насталяються на опуклі поверхні і взаємодіють між собою [1-8]. Вони впроваджуються ТОВ "НВК "Клімат" і встановлені у головному корпусі четвертого енергоблоку Рівненської АЕС. Виконується розробка способу організації повітрообміну з використанням струмин, що насталяються на опуклі та гнуті поверхні для музейних приміщень. Настилання дозволяє без додаткових витрат енергії формувати струмини широкого діапазону темпів затухання, що дозволяє використовувати їх для енергоефективної організації повітрообміну об'єктів різного призначення.

На даний час недостатньо розвинута теорія турбулентних струминних течій, вільних та напівобмежених, що насталяються на поверхні. Тому актуальною задачею є розробка підходів до аналітичного опису струминних течій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Критеріям простоти, легкості розуміння та застосування найбільш відповідає теорія турбулентних примежових шарів професора А.Я.Ткачука [9] на базі методу особливостей. Дрібні вихрові утворення у даній теорії виконують роль особливостей. При цьому не використовуються фіктивні величини і експериментальні константи - "турбулентна в'язкість", "турбулентне число Прандтля" тощо. Професор А.Я.Ткачук теоретично отримав більшість відомих експериментальних формул для пристінних примежових шарів та вільних ізотермічних струмин. Вільні плоскі струмини складаються з двох примежових шарів з різних боків від осі, а вісь вважається чіткою межею розділу примежових шарів.

Характерною особливістю турбулентних струминних течій є великомасштабні вихрові утворення — клуби. Їхні розміри сумірні з розмірами

примежового шару, а значить, вони утворюють певну упорядковану геометричну структуру. Пояснення механізму формування клубів дав І.А.Шепелев [10], але у його роботах не виконано аналізу цієї структури. Тому розвитком теорії професора А.Я. Ткачука є геометричний аналіз макроструктури струминних течій. Цьому аналізу присвячені роботи [11-13,15-20 та ін.].

**Формулювання цілей та завдання статті.** Дана робота є підсумком першого етапу розробки підходів до наближеного аналітичного опису турбулентних струминних течій для вирішення задач вентиляції і кондиціонування повітря на базі геометричного та кінематичного аналізу структури струминного примежового шару. Метою цього етапу було дослідження окремих типів струмин для створення системи припущень та перевірки їхньої адекватності.

**Основна частина.** Аналіз візуальних досліджень вільних турбулентних струминних течій, у тому числі авторських (рис. 1,а,б), дозволяє стверджувати, що клуби мають тенденцію зростати з виходом за межу струминного примежового шару. У вільних плоских струминах на відміну від схеми (рис. 1,в) І.А.Шепелева [10] (де клуби розміщуються один навпроти одного) клуби занурюються глибше осі струмини у сусідній примежовий шар (рис. 1,г), що розмиває границю між примежовими шарами вздовж осі і призводить до їхньої взаємодії. Між клубами з зовнішнього боку утворюється міжклубний шар, де реалізується підтікання повітря до струмини у напрямку, перпендикулярному до осі. Міжклубний шар біля осі має вигляд хвилеподібної доріжки, схожої на доріжку Кармана у сліді за тілом. Оскільки швидкість на цій доріжці максимальна, а на зовнішній межі — близька до нуля, то клуби котяться зовнішньою межею.

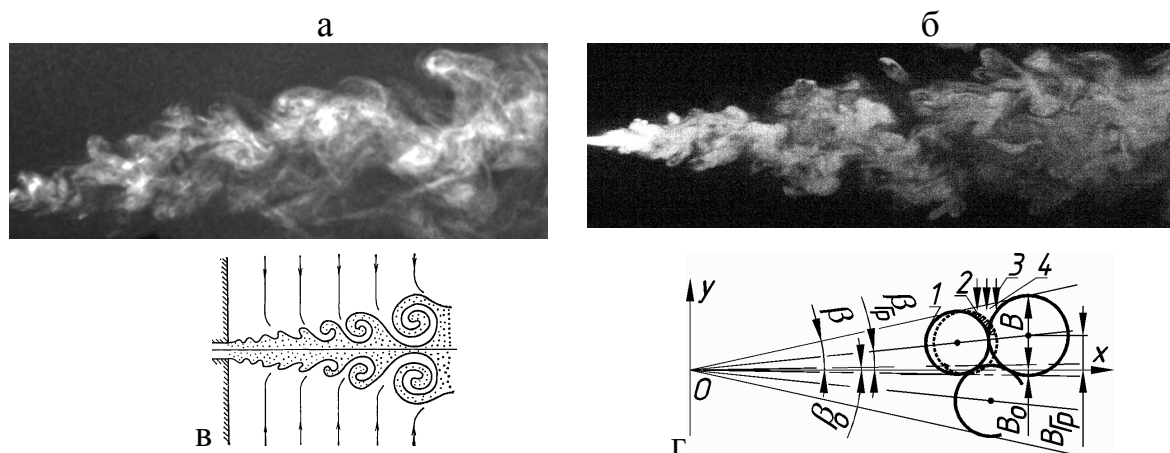


Рис. 1. Вільні струмини:

а — вісесиметрична струмина слабого розчину ураніну при освітленні лампою Вуда [11], б — зрізи плоских струмин слабого розчину ураніну при освітленні плоским променем фіолетового напівпровідникового лазера 405 нм 250 мВт (у приміщенні зі щільно задратованими вікнами або без вікон задля безпеки), в — схема І.А.Шепелева, г — схема макроструктури вільних струмин:

1 — клуб, 2 — ежектований ним об'єм повітря, 3 — потік, що підтікає, 4 — міжклубний шар

Для визначення темпу затухання і розширення струмини використовуємо той факт, що для підтримання напрямку підтікання, перпендикулярного до осі струмини, клуби мають ежектувати усе повітря об'єму (заштриховано на рис. 1,г) зовнішньої частини міжклубного шару, який вони займають перед собою під час руху.

Геометричний та кінематичний аналіз такої схеми дозволив без залучення дослідних коефіцієнтів отримати:

- залежності [12] для співвідношення між характерними розмірами струмини — шириною  $B$ , основним характерним розміром  $B_{Гр}$  струмини за М.Й.Гримітліним (відстанню у перерізі між віссю та точкою, де швидкість  $v$  дорівнює половині осьової  $u_m$ ) та глибиною занурення клубів у сусідній примежовий шар  $B_o$ :

$$B_{Гр} = 0,4655B, \quad B_o = 0,069B; \quad (1)$$

- фундаментальну константу струмини — тангенс кута розширення основної ділянки  $\text{tg}(\beta)=0,22$ ;
- профіль швидкості  $u$  [11] і надлишкової температури  $\Delta t$  [13]:

$$\begin{aligned} u/u_m = & (5,9293(y/B)^3 - 15,802(y/B)^2 + \\ & + 15,62973(y/B) - 6,75702)(y/B)^2 + 1; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta t/\Delta t_m = & 1 \text{ при } y/B \leq 0,069, \\ \Delta t/\Delta t_m = & 1,063039 - 0,904753(y/B) - 0,128364(y/B)^2 \\ & \text{при } 0,069 < y/B \leq 0,83, \\ \Delta t/\Delta t_m = & 2,78562 - 5,06441(y/B) + 2,38279(y/B)^2 \\ & \text{при } 0,069 < y/B \leq 0,83, \end{aligned} \quad (3)$$

Порівняння запропонованих профілів (2) та (3) з даними інших авторів та дослідними значеннями наведено на рис. 2.

- темп затухання швидкості і надлишкової температури на основній ділянці, що відповідає відомим залежностям [14]:

$$\begin{aligned} u_m/u_o = & m(B_o/x)^{1/2}; \\ \Delta t/\Delta t_o = & n(B_o/x)^{1/2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $u_o$  и  $\Delta t_o$  — швидкість та надлишкова температура у повітровипускній щілині,  $B_o$  — ширина щілини,  $m$  та  $n$  — коефіцієнти зміни надлишкової температури, отримані аналітичні значення яких збігаються з відомими довідниковими ( $m=2,5$ ;  $n=2$ ).

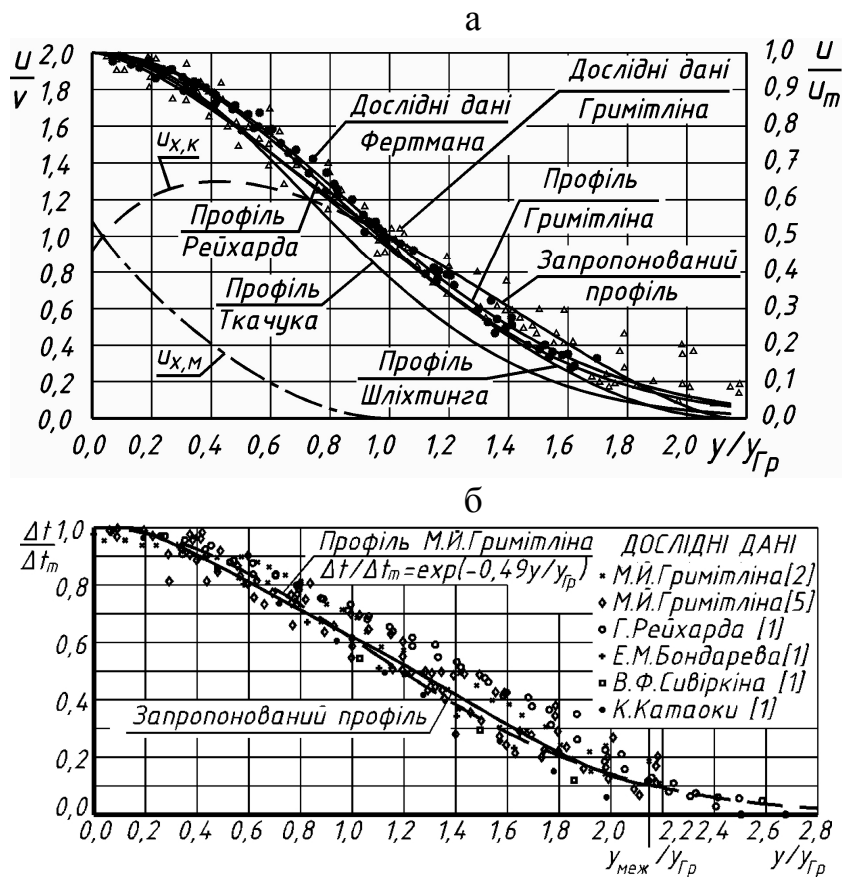


Рис. 2. Профілі:  
 а — швидкості [11],  
 б — температури [12]

Аналогічні підходи застосовані для напівобмежених струмин (рис. 3), що настилаються на поверхні різної форми. Такі струмини мають два примежових шари з різних боків від поверхні максимальних швидкостей у перерізах: пристінний (з боку поверхні настилення) та струминний (з боку вільної межі). Якщо струмина є двовимірною, то поверхня максимальних швидкостей проєціюється у лінію максимальних швидкостей.

За аналогією до вільних струмин клуби (рис. 4) струминного примежового шару мають тенденцію занурюватися глибше поверхні максимальних швидкостей. І.А.Шепелев запропонував [10] не брати до уваги пристінний примежовий шар, оскільки у плоских струминах він займає 10% перерізу. Однак похибки отриманих формул перевищили 10%. Уточнена гіпотеза І.А. Шепелева передбачає умовне продовження клубів до поверхні настилення. При цьому не береться до уваги біля 5% перерізу, де швидкість значно менша за осьову. Похибка отриманих залежностей не перевищує 5%, що відповідає похибці експериментальних досліджень.

Геометричний та кінематичний аналіз такої схеми дозволив отримати без залучення дослідних коефіцієнтів залежності для співвідношення між характерними розмірами струмини - шириною  $B$ , основним характерним розміром струмини за М.Й. Гримітліним  $B_{Gr}$ , - закономірності розширення та затухання швидкості плоских, опуклих та гнутих напівобмежених струмин.

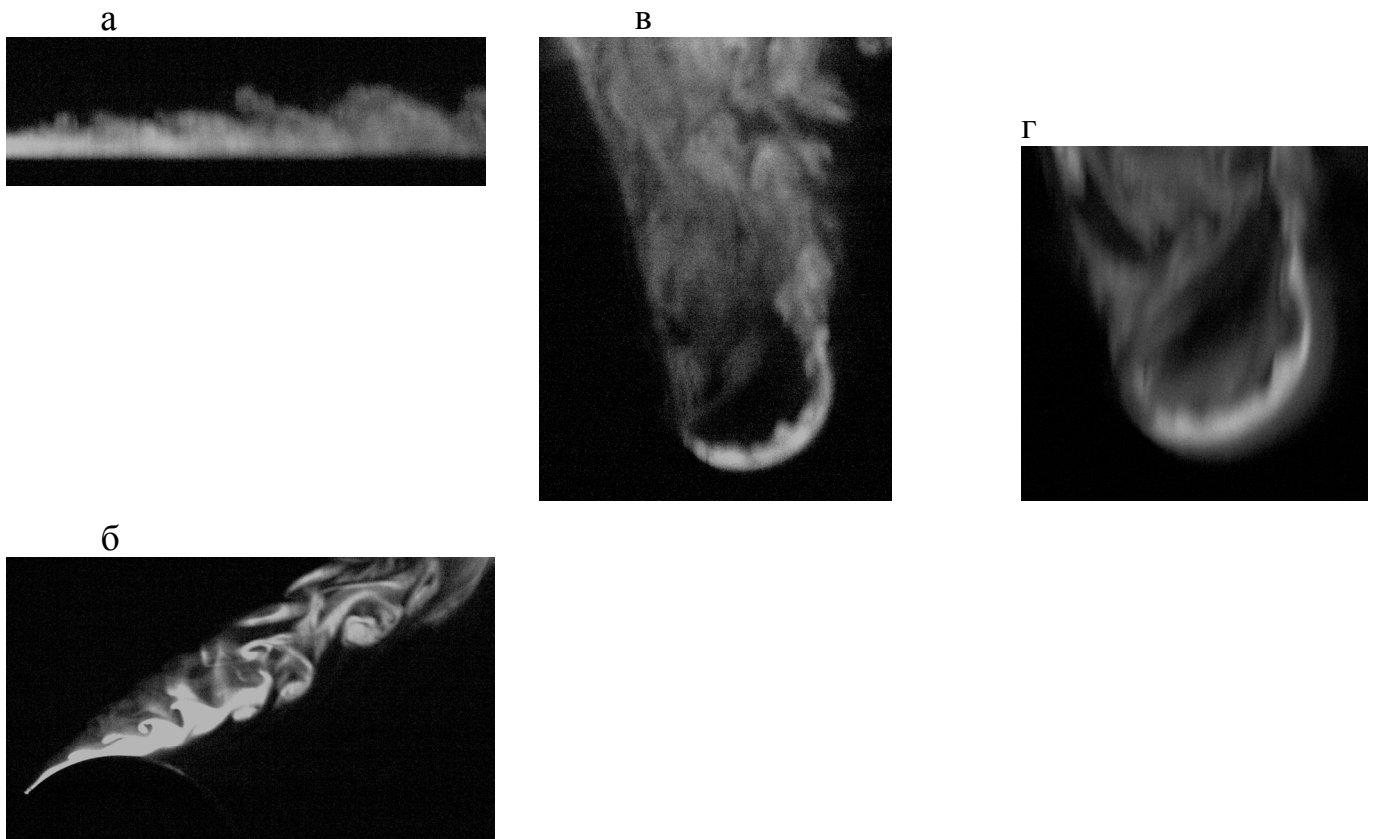


Рис. 3. Зрізи напівобмежених струмин при освітленні плоским променем фіолетового напівпровідникового лазера 405 нм 250 мВт:  
 а — плоскої (протягом досліду залишаються аналогічними),  
 б — опуклої (протягом досліду залишаються аналогічними)  
 в — гнutoї на початку досліду, візуалізується первинна струмина та рециркуляція потоку після відриву  
 в — гнutoї після отримання достатньої концентрації фарбника у навколишньому середовищі, візуалізується первинна струмина (яскраво) та вторинна струмина (менш яскраво)

Для скорочення обсягу даної роботи ці залежності не наведені, оскільки вони опубліковані у роботах [15-20]. У цих роботах було показано збіг аналітичних даних з дослідними.

Особливістю гнутих струмин є те, що швидкість підтікання повітря  $v$  (рис. 4г), нормальна до поверхні максимальних швидкостей у певному перерізі, має позитивну проекцію на дотичну до лінії максимальних швидкостей у перерізах, наступних за ходом струмини. Тобто потік, що підтікає, утворює вторинну струминну течію (рис. 3,г), яка значно розширює межі гнutoї напівобмеженої струмини. Це підтверджує не тільки математичне моделювання за  $k$ - $\epsilon$  моделлю турбулентних течій [18], але і візуальні дослідження (рис. 4,г). На початку подачі зафарбованого потоку візуалізується лише первинна струмина (рис. 4,в). За рахунок ежекції первинною струминою, що настає, течія після відриву може частково рециркулювати (рис. 4,в,г). Ця рециркуляція призводить до інтенсифікації затухання струмини після відриву,

що має стати одним з напрямків розробки повітророзподільних пристроїв з високим темпом затухання струмин. Коли концентрація фарбника у навколишньому середовищі стає достатньою (рис. 4,г), починає візуалізуватися вторинна струминна течія, що має значно більшу ширину, ніж первинна. Тобто гнуті напівобмежені струмини утворюються взаємодією двох струминних течій — первинної та вторинної.

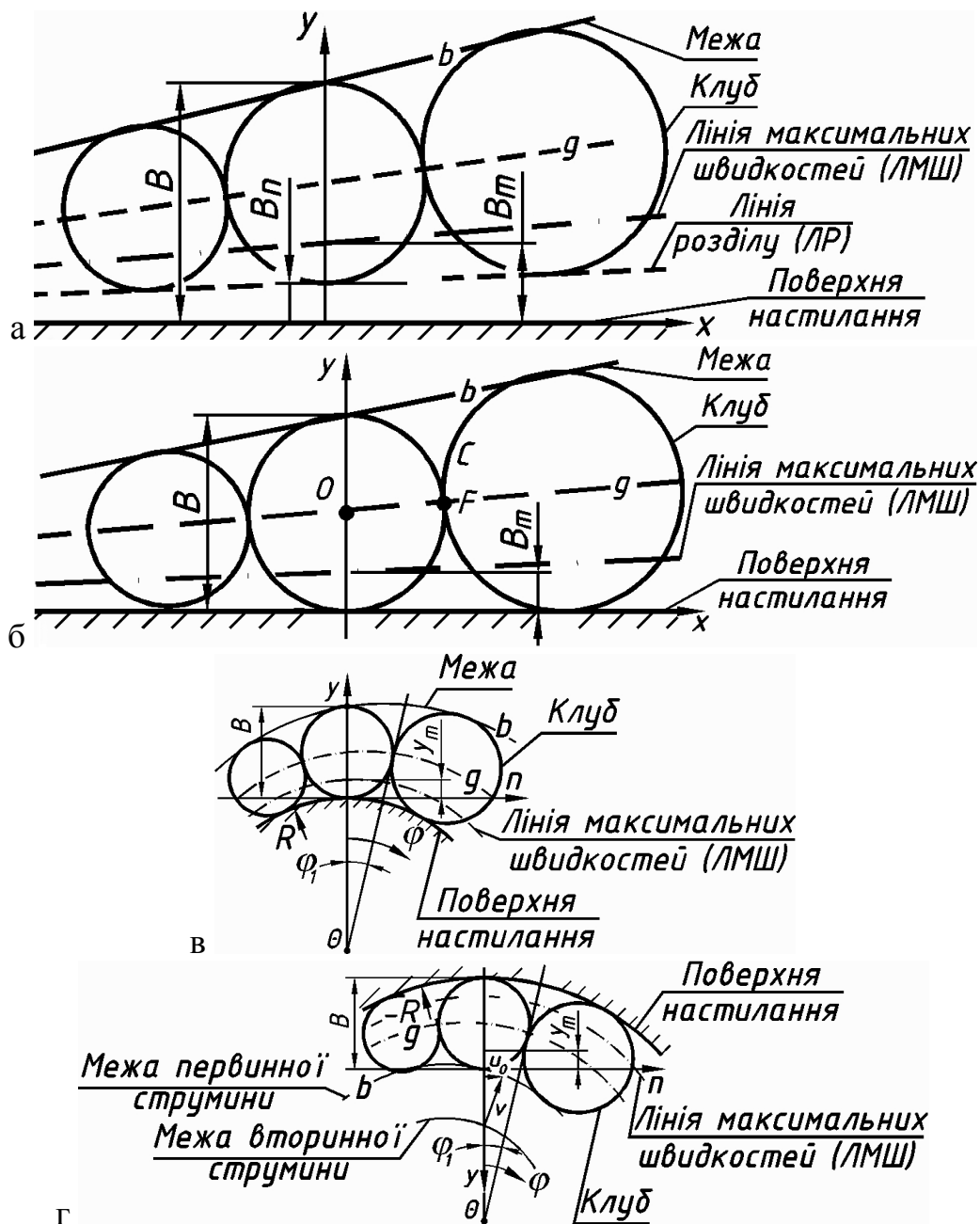


Рис. 4. Схеми напівобмежених струмин:  
 а — плоскої; б — плоскої за уточненою гіпотезою І.А.Шепелева;  
 в — опуклої за уточненою гіпотезою І.А.Шепелева;  
 г — гнutoї за уточненою гіпотезою І.А.Шепелева

## Висновки

1. Запропоновано підхід до аналітичного опису турбулентних струминних течій на підставі геометричного та кінематичного аналізу макроструктури струминного прилежового шару. Підхід дозволяє без залучення дослідних коефіцієнтів отримувати залежності профілів швидкості і температури та закономірності розвитку струмин.

2. На підставі аналізу макроструктури турбулентних гнутих напівобмежених струмин та візуальних досліджень показано, що ці струмини утворюються в результаті взаємодії первинної струмини зі вторинною, яку продукує первинна струмина за рахунок підсмоктування повітря. Наявна рециркуляція струмини після відриву посилює темп її затухання і є одним з перспективних напрямків розвитку повітророзподільної техніки.

**Перспективи подальших досліджень.** Другий етап даної роботи передбачає аналітичний опис взаємодії турбулентних струминних течій. Це дозволить обґрунтувати шляхи удосконалення повітророзподільників ПЕТ, виконати аналітичне обґрунтування та оптимізацію запропонованих у роботі [21-24 та ін.] схем організації повітрообміну на базі струмин, які взаємодіють між собою та аналітично вирішити багато інших задач енергоефективного повітророзподілення у приміщеннях.

## Література

1. Патент № А 44971 UA 7 F 24 F 13/06. Повітророзподільник. / Ткачук А.Я., Мілейковський В.О. // Промислова власність. – 2002. – №3. Кн.1 – С. 4.82
2. Патент № С2 73805 UA 7 F 24 F 13/06. Повітророзподільник (варіанти). / Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О., Кібеко О.М., Шенгелевич В.І. // Промислова власність. – 2005. – №9. Кн.1. – С. 3.138
3. Патент № С2 73818 UA 7 F 24 F 13/06. Повітророзподільник. / Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О., Кібеко О.М., Шенгелевич В.І. // Промислова власність. – 2005. – № 9. Кн.1 – С. 3.139.
4. Патент № 91617 UA МПК(2009) F 24 F 13/06. Повітророзподільник. / Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О., Кривша К.Є.
5. Патент № 96625 UA МПК(2011.01) F 24 F 13/00 F 24 F 13/06 (2006.01). Повітророзподільник. / Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О., Драчук М.М.
6. Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О. Формування струмин при тангенціальних випусках повітря з повітророзподільника // Нова тема: Журнал Асоціації інженерів енергоефективних технологій України: Науково-технічний журнал. – № 2. – К., 2007. – 44с. – С. 22-24.
7. Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О. Системи вентиляції з транзитним повітророзподіленням // Будівництво України: Науково-виробничий журнал. – № 5, 2007. – 48 с. – С. 34-37.
8. Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О., Ситницька А.К. Математичне моделювання повітрообміну в теплонапружених приміщеннях

при компактному розташуванні обладнання // Нова тема: Журнал Асоціації інженерів енергоефективних технологій України: Науково-технічний журнал.– № 3. –К., 2009. – 56с. – С. 13-15.

9. *Ткачук А.Я.* Розрахункова модель усередненого руху в турбулентній зоні плоских і вісесиметричних пристінних примежових шарів // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. – Вип. 2. – К.: КНУБА, 2001. – 104 с. – С. 3-18

10. *Шепелев И.А.* Аэродинамика воздушных потоков в помещении. – М.: Стройиздат, 1978. – 144 с.

11. *Мілейковський В.О.* Геометричне обґрунтування профілю швидкості в струминних примежових шарах // Будівництво України: Науково-виробничий журнал. – № 1, 2010. – 48 с. – С. 17-20.

12. *Мілейковський В.О.* Геометричне моделювання вільних ізотермічних струмин // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Прикладна геометрія та інженерна графіка». Вип. 82. Відповідальний редактор В.Є.Михайленко.–К.:КНУБА, 2009 р.– 400с. – С.190-196

13. *Мілейковський В.О.* Визначення розподілу температури та концентрації в струминному примежовому шарі з використанням геометричного підходу // Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. Випуск 13. Головний редактор Е.С. Малкін. - К.: КНУБА, 2009.- 108 с. – С.3-8

14. *Гримитлин М.И.* Распределение воздуха в помещениях. – М.: Стройиздат, 1982.–164 с.

15. *Мілейковський В.О.* Геометричне моделювання плоских напівобмежених струмин // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Прикладна геометрія та інженерна графіка». Вип. 86. Відповідальний редактор В.Є.Михайленко.–К.:КНУБА, 2010 р.– 472с. – С.187-191

16. *Мілейковський В.О.* Обґрунтування профілю швидкості плоских напівобмежених струмин // Нова тема. Науково-виробничий журнал №1 2011 р. - С.34-36

17. *Мілейковський В.О.* Геометричний аналіз структури плоских напівобмежених струмин // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Прикладна геометрія та інженерна графіка». Вип. 87. Відповідальний редактор В.Є.Михайленко.–К.:КНУБА, 2011 р.– 490с. – С.275-280

18. *Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О.* Геометричний аналіз структури струмин, що настилаються на поверхні різної кривини // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Прикладна геометрія та інженерна графіка». Випуск 89. Відповідальний редактор В.Є.Михайленко. – К.: КНУБА, 2012р. – 408с. – С.156-165.

19. *Mileikovskiy V.* Geometrical Modelling of the Jet Boundary Layer // 3rd International Scientific Conference moNGeometrija 2012: Serbia, Novi Sad, June 21st–24th: Proceedings. – Novi Sad, 2012. – 673p. – P. 189.

20. *Mileikovskiy V.* The Geomtrical Analysis of Structure of the Semibounded Currents // Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Secțiunea Construcții de Mașini, Tomul LVII(LXI), Fasc. 3, 2011 – Iași, 2011 14. – P. 203-210.



21. *Возняк О.Т., Ковальчук А.О.* Повітророзподіл зустрічними неспіввісними круглими струминами // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. – Вип. 6. – К.: КНУБА, 2003. – 104 с. – С. 5-10.

22. *Возняк О.Т.* Вплив взаємодії струмин на повітророзподіл у приміщенні // Вісник НУ «Львівська політехніка».–Львів, 2001.– С. 27–31.

23. *Возняк О.Т., Ковальчук А.О.* Ефективність повітророзподілу зустрічними неспіввісними струминами // Вісник Національного Університету «Львівська політехніка» №460 Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація.–Львів, 2002.– С. 157–161

24. *Vozniak O., Kovalchuk A.* Air distribution by opposite non-coaxial air jets // VII Vedecka Konferencia s medzinarodnou ucastou Kosicko-Lvovsko-Rzeszowska: Zbornik prednasok. –Kosice, 2002.– С. 173–178..

#### **Аннотация**

Предложен подход к приближенному аналитическому описанию турбулентных вентиляционных струй путём геометрического анализа макроструктуры струйного пограничного слоя без использования экспериментальных коэффициентов, понятий «турбулентная вязкость» и «турбулентное число Прандтля». На первом этапе исследованы струи различных типов и показано соответствие расчетных и экспериментальных данных.

#### **Annotation**

We offer an approach to the approximate analytical description of turbulent ventilation currents using a geometric analysis of the jet boundary layer macrostructure without the use of experimental factors, the concepts of "turbulent viscosity" and "turbulent Prandtl number." In the first stage we research individual types of currents and show the adequacy of calculated and experimental data.