

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАКРОСТРУКТУРИ ПРИМЕЖОВОГО ШАРУ МІЖ ПОТОКАМИ, ЩО РУХАЮТЬСЯ З РІЗНОЮ ШВИДКІСТЮ

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
Україна*

Запропоновано підхід до наближеного аналітичного опису турбулентних примежових шарів між потоками, які взаємодіють, шляхом аналізу макроструктури без використання дослідних коефіцієнтів, понять «турбулентна в'язкість» та «турбулентне число Прандтля».

Постановка проблеми. У вентиляційній техніці широко застосовується взаємодія між потоками повітря. Взаємодія затоплених припливних струминних течій широко застосовується при подачі повітря у вентиляованих приміщеннях. Серед останніх рішень можна відзначити розроблені на кафедрі теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури повітророзподільники [1-5] ежекційні тангенціальні ПЕТ (автори — доценти В.Б. Довгалюк та В.О. Мілейковський; впроваджуються ТОВ “науково-виробничий комплекс “Клімат”), які використовують взаємодію струмин, що насталяються на опуклі поверхні. Припливні струмини взаємодіють з конвективними потоками та іншими потоками повітря у приміщенні, що необхідно враховувати при побудові ефективних схем організації повітрообміну. Таким чином, дослідження взаємодії потоків є актуальною задачею.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Основною проблемою досліджень є недостатній розвиток теорії турбулентних течій. Критеріям простоти, легкості розуміння та застосування найбільш відповідає теорія турбулентних примежових шарів професора А.Я.Ткачука [6] 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. На сьогодні виконується узагальнення даного підходу для потоків з великомасштабною вихровою структурою, у тому числі, для затоплених струминних течій та слідів при обтіканні тіл.

Г.Н. Абрамович [7] відзначив невдалі спроби створення теорії примежового шару між потоками, що взаємодіють (теорія Кьюза, теорія Л.А. Вуліса, В.П. Кашкарова і Т.П. Леонтьєвої). Основною проблемою є відсутність подібності профілів швидкості при різних умовах, що

суперечить дослідним даним (рис. 1). Натомість запропоновано при розгляді взаємодії потоків зі швидкостями u_1 та u_2 користуватися повною аналогією зі струминою, випущеною з початковою швидкістю u_0 , у супутньому (або зустрічному) потоку зі швидкістю u_n , яка на відстані x має півширину B .

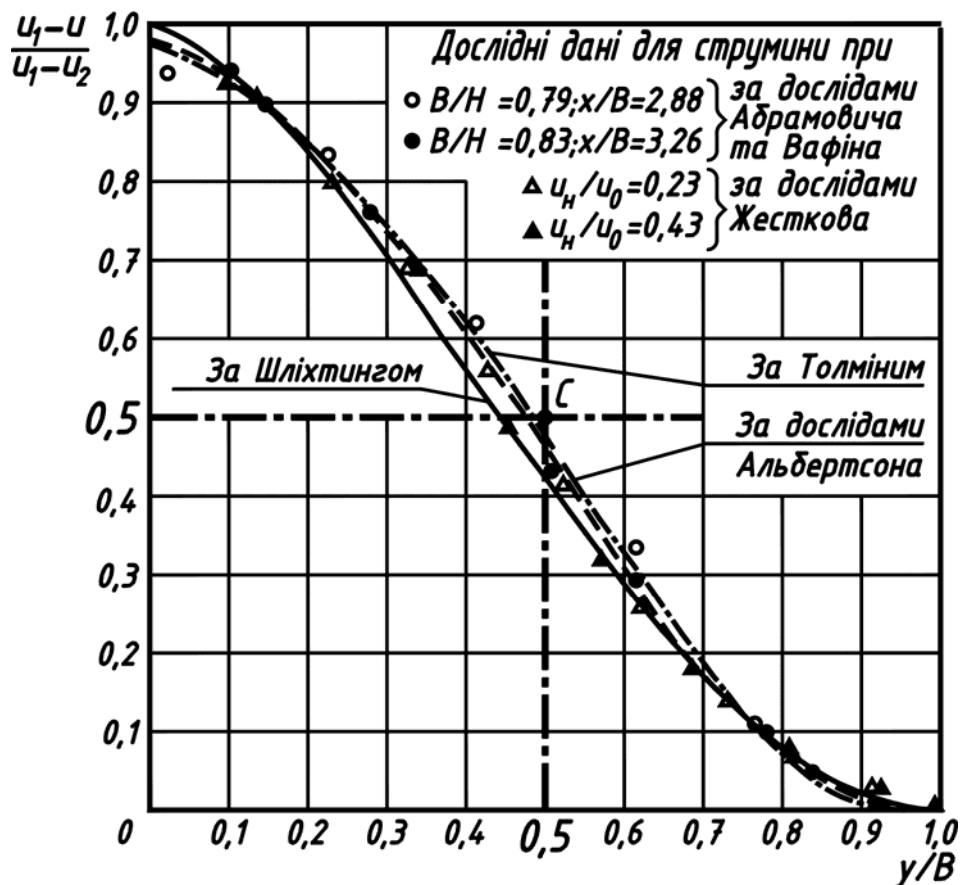


Рис. 1. Профіль швидкості примежового шару між потоками за Г.Н. Абрамовичем.

Розглянемо випадок, коли $|u_1| \geq |u_2|$. Профіль швидкості у примежовому шарі між потоками, повна ширина якого дорівнює B , прийнято як половину профілю швидкості, характерного для вільних струмин (рис. 1) при тому ж значенні півщини B . При такому підході виникає асиметрія профілю швидкості відносно центру C (на перетині штрих-пунктирних ліній). Якщо розглянути взаємодію потоків, спрямованих у протилежних напрямках з однаковими швидкостями, то отримаємо симетричну задачу, де неможливо виділити основний та другорядний потоки. Тому і профіль швидкості очікується симетричним. У цьому випадку Г.Н. Абрамович припускає додаткову нестійкість руху, за якої головним стає почергово потік 1 та потік 2. Тому необхідно ввести поправку, яка дозволить досягти симетрії профілю швидкості.

Межа змішування потоків досліджувалася у роботі Л.Д. Ландау та Е.М. Ліфшиця [8]. Межа змішування потоків нестійка, що призводить до її

“розбобтування” і турбулізації. У роботі [9] зазначено, що “межа здійснює характерний хвилеподібний рух”. Вона може бути сформована вихровою пеленою, аналогічною тій, яку розглядає у своїй теорії професор А.Я. Ткачук. Різниця полягає лише у тому, що у першому випадку вихори великомасштабні, а у другому — дрібномасштабні.

Наявність упорядкованої макроструктури великомасштабних вихорів (клубів) у струминах відома здавна (завдяки спостереженням за потоками диму), задовго до формування гідроаеродинаміки як науки, про що свідчать витвори мистецтва. Наприклад, на рис. 2, а наведена фотокопія картини Тиціана Вечелліо, написаної у XVI столітті. При зображенні диму автор показав саме упорядковану макроструктуру, утворену великомасштабними вихорами — клубами, розміри яких сумірні з розмірами самого потоку. Зображення потоку диму виконано практично симетрично відносно осі. Саме такий принцип покладено в основу схеми формування клубів (рис. 2, б) І.А. Шепелева, виконаної чотири століття пізніше.



Рис. 2. Зображення струминних течій: а - Картина Тиціана Вечелліо (1488/1490 — 1576) Авель і Каїн*. При зображенні диму чітко видно упорядковану макроструктуру потоку, утворену клубами; б — схема формування клубів І.А. Шепелева

Після того, як А. Таунсенд звернув увагу на суттєву роль великомасштабних вихорів у формуванні струминних течій [10], наукове обґрунтування упорядкованості макроструктури виконали Г. Браун та А. Рошко [11, 12] на базі досліджень Х. Гранта та Д. Триттона [10, 13] і власних експериментів. При змішуванні потоків вихори рухаються зі

* http://ru.wikipedia.org/wiki/Файл:Titian_-_Cain_and_Abel.JPG

швидкістю u_6 , близькою до середнього арифметичного швидкостей потоків [12, 14, 15]:

$$u_6 \approx (u_1 + u_2) / 2 \quad (1)$$

Така ситуація спостерігається, якщо вихори котяться межами незбурених потоків. З іншого боку, якщо б між границею вихору та межами потоків існувала різниця швидкостей, то сила Магнуса винесла би вихор до одного з потоків і порушила регулярну структуру.

Щодо розвитку макроструктури у різних роботах наведені різні припущення. У роботах А. Рошка [12], Рокуелла, Нікколза [16] прийнято, що розвиток макроструктури відбувається злиттям вихорів, а у роботі І.А. Шепелева [17] — шляхом розпаду. Авторські дослідження [18, 19] виявили роль ежекції навколишнього повітря вихорами. Останнє припущення дозволило отримати крім профілів швидкості та температури темп розширення та затухання струмин різної форми без залучення дослідних даних.

Формулювання цілей та завдання статті. Дана робота починає другий етап досліджень макроструктури турбулентних струминних течій, що передбачає аналітичний опис взаємодії турбулентних струмин. У даній роботі буде побудована спрощена схема макроструктури турбулентного примежового шару, що утворюється при контакті потоків, які рухаються з різною швидкістю. За цією схемою буде визначено поправки, які дозволяють використовувати дані щодо параметрів вільних струмини для примежового шару, утвореного при взаємодії потоків.

Оригінальна частина. Аналіз візуальних досліджень вільних турбулентних струминних течій, у тому числі авторських (рис. 3, а, б), дозволяє стверджувати, що у вільних струминах структура, показана на рис. 1 не є стійкою. Клуби мають тенденцію упорядковуватися у шаховому порядку (рис. 3, в). 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.

При взаємодії двох потоків між ними утворюється розрив тангенціальної складової швидкості. За теорією А.Я. Ткачука цей примежовий шар моделюється вихровою пеленою (рис. 3, г). Ця спочатку нескінченно тонка пелена ежектує повітря потоків і зростає. У міжклубному шарі реалізується підтікання рідини або газу до клубів перпендикулярно напрямку швидкості потоків, а повздовжня складова швидкості за інерцією практично зберігається. Якщо обидва потоки не обмежені твердими поверхнями, то розширення триває нескінченно. Порівняння рис. 3, в та г показує, що половина примежового шару між

потоками ідентична зовнішній частині вільної струмини у супутньому потоку поза лінією, що сполучає центри вихорів.

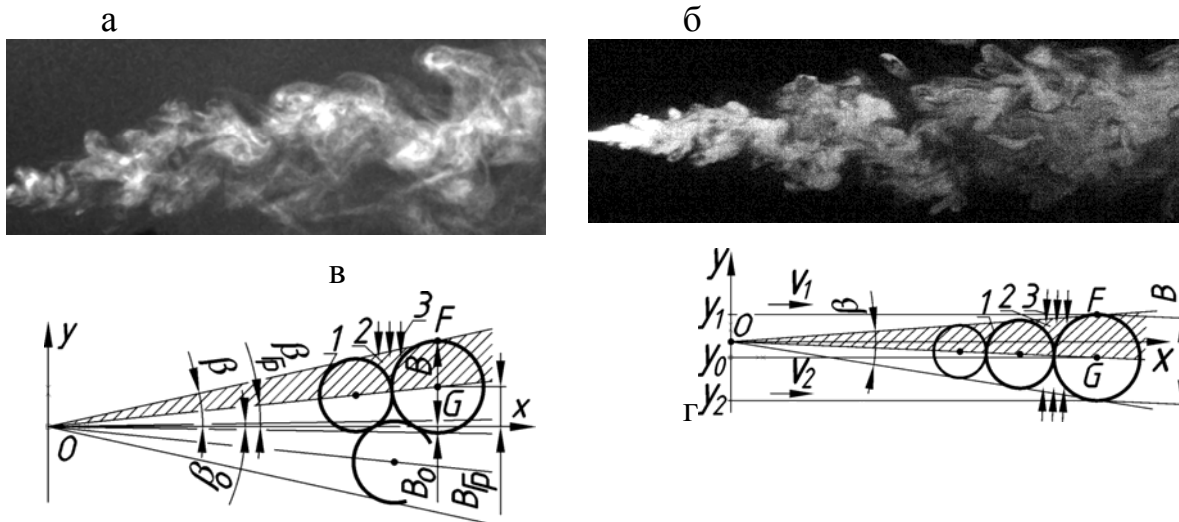


Рис. 3. Вільні струмини:

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 макроструктури вільних струмин у нерухомому середовищі або супутньому (зустрічному) потоку, **г** — макроструктура примежового шару між потоками, які взаємодіють:

1 — клуб, **2** — міжклубний шар, **3** — потік, що підтікає

Уводимо декартову систему координат x , y , причому вісь y спрямуємо від потоку 2 до потоку 1 перпендикулярно їхнім швидкостям, а вісь x — у напрямку швидкості. Ординати меж примежового шару з потоками, відповідно, 1 та 2 позначимо y_1 та y_2 . Ордината центра вихору (позначена за аналогією до струмин):

$$y_{Гр} = (y_1 + y_2) / 2 \quad (2)$$

Ширина примежового шару:

$$B \approx y_1 - y_2 \quad (3)$$

Для зручності поставимо характерні точки на схемах макроструктури примежових шарів (рис. 3, в, г) та на профілі швидкості (рис. 1), наприклад, Шліхтинга. Ординату характерної лінії за Грімтліним (відповідає точці G), де швидкість дорівнює половині осьової, позначимо $y_{Гр}$. Виконуємо лінійне масштабування, щоб точка G відобразилася до центра графіку C . При цьому для симетрування графіка більш зручно

використовувати інші осі координат з центром $C(0,0)$ і діапазоном від мінус одиниці до одиниці. Абсциса:

$$\tilde{y} = 2(y - y_6)/B; \quad (4)$$

ордината:

$$\tilde{u} = 2(u_6 - u)/(u_1 - u_2). \quad (5)$$

Якщо профіль швидкості у струмині

$$(u_1 - u)/(u_1 - u_2) = f(y/B), \quad (6)$$

то профіль швидкості у примежовому шарі:

$$\tilde{u} = g(\tilde{y}) = (2f((1 - (y_{Гр}/B))|\tilde{y}| + (y_{Гр}/B)) - 1)\text{sgn}(\tilde{y}), \quad (7)$$

де $(y_{Гр}/B)$ — константа ($0 < y_{Гр}/B < 1$), що залежить тільки від функції f і визначається з рівняння:

$$f(y_{Гр}/B) = 1/2, \quad (8)$$

а $\text{sgn}(x)$ — функція знаку, що набуває значення плюс один при $x > 0$, мінус один при $x < 0$ та нуль при $x = 0$ і використовується для формування непарної функції профілю швидкості.

Якщо функція f монотонно спадає та гладка у межах аргументу від $y_{Гр}/B$ до одиниці, то похідна функції $g(y)$ має у межах від нуля до одиниці лише одну точку усунютого розриву при $y = 0$. Справді, за умов гладкості f у вищенаведених межах легко перевірити гладкість функції g окремо у межах $[-1, 0)$ та $(0, 1]$ за правилом взяття похідної складної функції. При $y < 0$ похідна

$$g'(\tilde{y}) = - (2f((1 - (y_{Гр}/B))(-\tilde{y}) + (y_{Гр}/B)) - 1)' = 2(1 - (y_{Гр}/B))f'(y/B).$$

При $y > 0$ похідна

$$g'(\tilde{y}) = (2f((1 - (y_{Гр}/B))\tilde{y} + (y_{Гр}/B)) - 1)' = 2(1 - (y_{Гр}/B))f'(y/B).$$

Обидві отримані залежності однакові, а значить, і межа похідної при $\tilde{y} \rightarrow 0$ ліворуч і праворуч також однакова, що доводить усунівність розриву за рахунок відсутності похідної функції $\text{sgn}(0)$. З фізичної точки зору даний профіль (7) нічим не гірший за гладкий.

Побудовані профілі швидкості (рис. 4) різних авторів, серед яких авторський профіль [20] з уведеною поправкою за формулою (7) добре збігаються з дослідними даними Альбертсона, а також, дослідним профілем Гримітліна, масштабованими за цією ж формулою. Аналогічно будуються профілі температури та концентрації домішок.

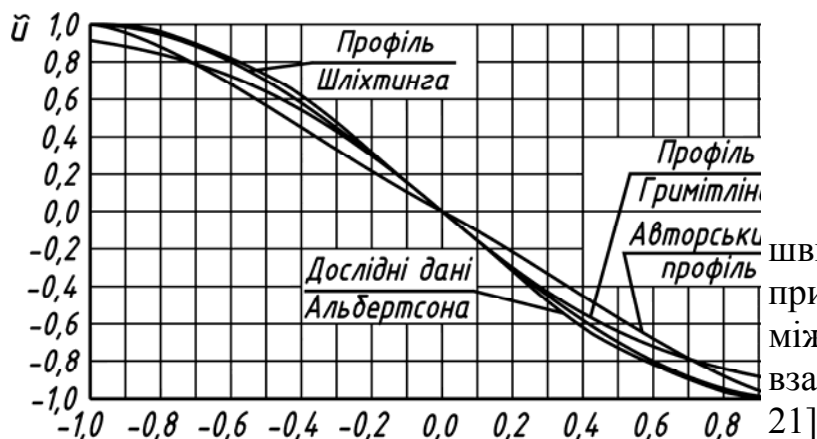


Рис. 4. Профілі швидкостей у примежовому шарі між потоками, що взаємодіють [7, 20, 21]

Вищенаведена аналогія дозволяє використовувати залежності для розширення струминних течій у супутніх потоках, яким будуть присвячені наступні роботи.

Висновки

1. Запропоновано підхід до наближеного аналітичного опису турбулентних струминних примежових шарів між потоками, що взаємодіють, на підставі геометричного та кінематичного аналізу макроструктури струминного примежового шару.

2. Запропонований підхід дає можливість без залучення дослідних коефіцієнтів отримати поправку, яка дозволяє застосовувати залежності, що описують струмини у супутніх потоках, для примежових шарів між потоками, що взаємодіють між собою.

Перспективи подальшого дослідження. Подальші дослідження будуть спрямовані на аналітичний опис макроструктури турбулентних потоків, які виникають в результаті взаємодії струминних течій. Серед них будуть розглянуті і течії у супутніх, зустрічних потоках та потоках під різними кутами до струмини. Це дозволить обґрунтувати шляхи удосконалення повітророзподільників ПЕТ, виконати аналітичне обґрунтування та оптимізацію запропонованих у роботах [22...25 та ін.] схем організації повітрообміну на базі струмин, які взаємодіють між собою та аналітично вирішити багато інших задач, пов'язаних зі струминними течіями.

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 № 96625UA МПК(2011.01)F24F13/00F24F13/06 (2006.01). Повітророзподільник./Довгалюк В.Б.,Мілейковський В.О., Драчук М.М.
6. 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
7. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. - М.: Гос. изд-во физ.-мат лит., 1960.- 715 с.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. – М.: Гостехиздат, 1953. – 788 с.
9. Бетчов Р., Криминале В. Вопросы гидродинамической устойчивости. – М.: Мир, 1971. – 351 с.
10. Grant H. The large eddies of turbulent motion // Journal of Fluid Mechanics, 1958, v. 4, pp. 149-190.
11. Brown G., Roshko A. On density effects and large structure in turbulent mixing layers // Journal of Fluid Mechanics, 1974, v.64, p.4, pp.775-816.
12. Рошко А. Структура турбулентных сдвиговых течений: новая точка зрения // Ракетная техника и космонавтика, 1976, т. 14, № 10, с. 8-20.
13. Tritton D. Some new correlation measurements in a turbulent boundary layer // Journal of Fluid Mechanics, 1975, v. 28, p. 3, pp. 439-462.
14. Озеберг, Клайн. Рецензия на статью Рокуэлл, Никколс. Естественное разрушение плоских струй (Труды АОИМ, сер. Д, 1972, т. 94, №4, с.15-26) // Труды АОИМ, сер. Д, 1972, т. 94, №4, с.24
15. Kalghatgi G. Study of Coherent Structures in Axisymmetric Jets Using an Optical Technique // AJAA Journal, 1980, v. 18, No 3, pp. 225-226
16. Рокуэлл, Никколс. Естественное разрушение плоских струй // Труды АОИМ, сер. Д, 1972, т. 94, №4, с.15-26
17. Шепелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. – М.: Стройиздат, 1978. – 144 с.
18. Мілейковський В.О. Визначення розширення та затухання плоских напівобмежених струмин // Будівництво України: Науково-

виробничий журнал. – № 6, 2011. – С. 42-44.

19. *Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О.* Аналітичні дослідження макроструктури струминних течій для розрахунку енергоефективних систем повітророзподілення // Науково-техн. збірник “Енергоефективність в будівництві та архітектурі”. Випуск 4. Відповідальний редактор П.М. Куліков. - К.: КНУБА, 2013 р. - 328 с. – С. 73-81.

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

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

22. *Возняк О.Т., Ковальчук А.О.* Повітророзподіл зустрічними неспіввісними круглими струминами // Вентиляція, освітлення та теплогазо-постачання: Наук.-техн.збірник. –Вип. 6.–К.: КНУБА, 2003.–104 с.–С.5-10.

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

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

25. *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..

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАКРОСТРУКТУРЫ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ МЕЖДУ ПОТОКАМИ, ДВИЖУЩИМИСЯ С РАЗЛИЧНОЙ СКОРОСТЬЮ

В.А. Милейковский

Предложен подход к приближенному аналитическому описанию турбулентных пограничных слоев между взаимодействующими потоками путём анализа макроструктуры без использования экспериментальных коэффициентов, понятий «турбулентная вязкость» и «турбулентное число Прандтля».

THE ANALYTICAL RESEARCHES OF THE BOUNDARY LAYER MACROSTRUCTURE BETWEEN FLOWS MOVING WITH DIFFERENT VELOCITIES

V. Mileikovskiy

We offer an approach to the approximate analytical description of turbulent boundary layers between interacting flows using an analysis of the macro-structure without the use of experimental factors, the concepts of "turbulent viscosity" and "turbulent Prandtl number."