

$$dA_c = (B_1 C_{13}) dx_\Delta = \eta (1 - \sin(\beta_{1/2})) dx_\Delta = \eta \left(1 - \Theta_{1/2} (1 + \Theta_{1/2}^2)^{-1/2}\right) (u_m - u_\infty) d\tau / 2, \quad (5)$$

Згідно з роботою [2], спожита площа йде тільки на зростання сумарної площі A_Σ клуба 1 та криволінійного трикутника $A_{13}A_{23}A_{12}$. Однак зовнішня частина міжклубного шару також зростає, що не було враховано у роботі [2]. Додатково криволінійний трикутник $B_1A_{13}C_3$. Таким чином, одержані громіздкі залежності, незручні для користування.

Для отримання зручних залежностей введемо опорну фігуру площею A_0 . Сумарна площа A_Σ , яка споживає площу dA_c , повинна бути пропорційною до A_0 у даній струмині. Відношення площ

$$a = A_0 / A_\Sigma = const. \quad (6)$$

визначається аналітично. Клуби та міжклубні шари гомотетичні з центром гомотетії O . Для забезпечення постійності відношення a в межах струмини достатньо вимагати гомотетичності опорних фігур, прив'язаних до кожного клубу, з тим же центром гомотетії. Слід вибирати опорну фігуру так, щоб отримати якомога простіші рівняння, а коефіцієнт a був якомога ближчий до одиниці. Остання рекомендація пришвидшує його визначення ітераційними методами. Бажано, щоб побудовані на кожному клубі опорні фігури заповнили практично всю струмину, але це також не є принциповим. Не знижує точність заміна площі A_0 наближеним або умовним значенням з розмірністю площі, якщо воно ж використовується при визначенні коефіцієнта a . Але це ускладнює розуміння фізичної суті. Балансове рівняння набуде вигляду

$$dA_c = dA_0 / a. \quad (7)$$

У цьому випадку зручно прийняти опорною фігурою трапецію $PQRS$. Лінії PS та QR проходять крізь точки A_{-11} та A_{13} перпендикулярно до осі x . Точки P та Q знаходяться на межі струмини, а S та R – на осі x . Якщо побудувати такі трапеції на кожному клубі, то буде заповнена уся струмина крім сегментів клубів на периферії, площа яких незначна. Середня лінія та висота:

$$l = (A_1 B_1) = \Theta x_1; \quad (8)$$

$$h = (A_{-11} A_{13}) \cos(\beta_{1/2}) = 2r_1 \cos(\beta_{1/2}) = 2r_1 / \sqrt{1 + \Theta_{1/2}^2}; \quad (9)$$

Таким чином, площа трапеції за рівняннями (3), (8) та (9)

$$A_0 = lh = \frac{2\Theta x_1 r_1}{\sqrt{1 + \Theta_{1/2}^2}} = \frac{2\Theta x_1^2 [\eta / x_1]}{\sqrt{1 + \Theta_{1/2}^2}} = \frac{2r_1^2}{(1 - (\Theta_{1/2} / \Theta)) \sqrt{1 + \Theta^2 (\Theta_{1/2} / \Theta)^2}} = \frac{r_1^2}{0,26725 \sqrt{1 + (0,4655\Theta)^2}}. \quad (10)$$

Визначаємо зміну площі A_0 за формулою (10) за час $d\tau$ при русі розрункового клубу 1 зі швидкістю v з урахуванням того, що вираз у квадратних дужках є константою:

$$dA_0 = 4\Theta x_1 [\eta / x_1] dx_1 = \frac{2\Theta \eta}{\sqrt{1 + \Theta_{1/2}^2}} (u_m + u_\infty) d\tau. \quad (11)$$

Підставляємо рівняння, (2), (5), (11) до залежності (7). Маємо після елементарних перетворень при $x \neq 0$:

$$\Theta = \frac{a/4}{\sqrt{(1 + 0,5[\Theta_{1/2} / \Theta]a)}} = \frac{a/4}{\sqrt{1 + 0,23275a}}. \quad (12)$$

Одним з найбільш ефективних способів визначення відношення площ a є комп'ютерне геометричне моделювання за допомогою САПР для параметричного моделювання [14-19]. Для побудови ескізів необхідно тільки накреслити примітиви (лінії, кола, дуги тощо) та задати зв'язки між ними (дотична, точка належить лінії, перпендикуляр, горизонтальна, вертикальна тощо). Далі наводяться розміри, при зміні яких ескіз перебудовується автоматично. Це дає змогу автоматизувати геометричний аналіз. Безкоштовним варіантом з відкритим кодом є система FreeCAD [20] для Microsoft Windows, Linux, MacOS. Вона розповсюджується за ліцензіями GPL та LGPL, які гарантують свободу (без права відкликання) використання та зміни програмного коду. У цій роботі використано україномовний FreeCAD 0.14 редакція 2935 (Git) на Ubuntu 14.04. У інших системах побудови аналогічні.

Креслимо ескіз (рис. 2, а) з можливістю зміни кута β . Для вимірювання відповідних площ можна або видавити відповідні частини ескіза, або експортувати його (рис. 2, б) до двовимірних САПР (DraftSight, NanoCAD тощо). У цій роботі використано безкоштовну версію DraftSight. Для наочності рисунка опорна фігура площею A_0 показана пунктиром і заштрихована з лівого нижнього до правого верхнього кута. Фігура з сумарною площею A_Σ виділена жирними лініями та заштрихована з лівого верхнього до правого нижнього кута.

Для визначення відношення площ a використовуємо послідовні наближення (табл.) за рівняннями (1), (6) та (12). У нашому випадку достатньо трьох ітерацій, що пояснюється вдалим вибором опорної фігури.

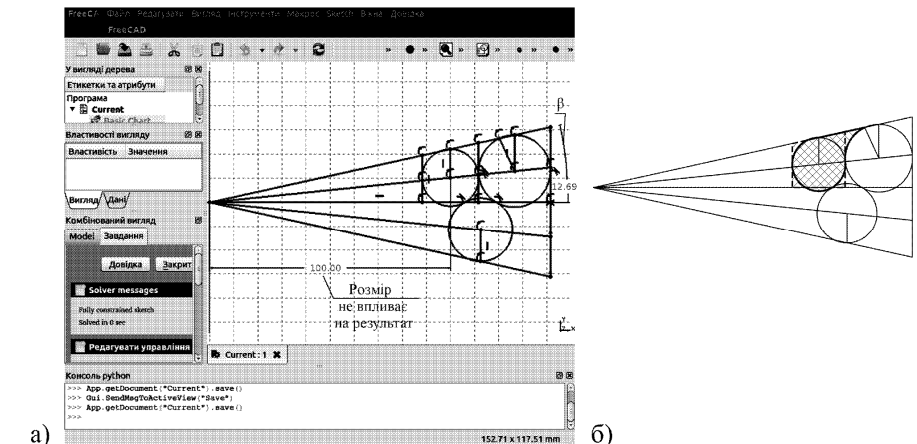


Рис. 2. Схема макроструктури струмини: а) ескіз; б) креслення

Табл. Результати комп'ютерного геометричного моделювання

Ітерація	Наближення a_0	Θ	кут β		$A_0, \text{мм}^2$	$A_\Sigma, \text{мм}^2$	Уточнене значення a
			°	рад			
1	1,0000	0,2252	12,69	0,2215	538,2520	558,2450	0,9642
2	0,9642	0,2178	12,29	0,2145	504,1388	522,2482	0,9653
3	0,9653	0,2181	12,30	0,2147	505,1525	523,3170	0,9653

Якщо послідовні наближення повільно збігаються або не збігаються, значить опорна фігура є недоцільною. Варто її змінити. У крайньому разі можна використати будь-який чисельний метод розв'язання рівняння, що є більш трудомісткою задачею. Отримане значення $\Theta = \text{tg}(\beta) = 0,2181$ повторює обидва відомі знаки дослідного значення $\Theta = 0,22$ [1]. Використання рівняння кількості руху дає змогу отримати загальновідомі залежності для затухання струминних течій [1]. При цьому тангенс кута розширення струмини не є дослідним коефіцієнтом, а визначений аналітично.

Точний геометричний аналіз дає громіздкі рівняння, розв'язком яких є $\Theta = \text{tg}(\beta) = 0,2179$. Це значення відрізняється від результатів комп'ютерного моделювання у четвертому знаку після коми або на 0,092 %. На точний геометричний аналіз було витрачено робочий день (8 годин). На побудову ескізу та виконання трьох ітерацій витрачено біля однієї години. Таким чином, для геометричного аналізу макроструктури турбулентних вентиляційних струминних течій рекомендується використовувати САПР для параметричного моделювання. Це дає змогу заощадити біля 90 % робочого часу.

Висновки:

1. Запропоновано уточнений підхід до визначення кута розширення вентиляційних турбулентних струмин. Отримано результат, що повторює загальновідомі експериментальні дані.

2. Показано переваги комп'ютерного геометричного моделювання за допомогою САПР для параметричного моделювання. Це дає змогу заощадити до 90 % робочого часу дослідника без втрати точності результатів. При цьому додаткові вкладення коштів у програмне забезпечення не обов'язкові. Існують безкоштовні САПР для параметричного моделювання (наприклад, FreeCAD)

Література

1. Ткачук А.Я. Аеродинаміка вентиляції : навч. посібн. / А.Я. Ткачук, В.Б. Довгалюк. – К. : Вид-во ІВНВКП "Укреліотех", 2009. – 376 с.
 2. Мілейковський В.О. Геометричне моделювання плоских напівобмежених струмин // Прикладна геометрія та інженерна графіка : матер. Міжвідомч. наук.-техн. зб. / відпов. ред. В.С. Михайленко. – К. : Вид-во КНУБА. – 2010. – Вип. 86. – 472 с. – С. 187-191.
 3. Thool S.B. Simulation of Room Airflow using CFD and Validation with Experimental Results / S.B. Thool, S.L. Sinha // International Journal of Engineering Science and Technology. – Vol. 6, Issue 5 (2014). – Pp. 192-202.
 4. Kuřačka L. Ventilation of idealised urban area, LES and wind tunnel experiment / L. Kuřačka, V. Fuka, Š. Nosek, R. Kellnerová, Z. Jaňour // EPJ Web of Conferences. – Vol. 67 (2014). – Pp. 20-62.
 5. Berner A.H., Bretherton C.S., R. Wood R. Large-eddy simulation of ship tracks in the collapsed marine boundary layer: a case study from the Monterey Area Ship Track experiment // Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. – Vol. 14, Issue 17 (2014). – Pp. 24387-24439.
 6. Safari M. Progress in the Prediction of Entropy Generation in Turbulent Reacting Flows Using Large Eddy Simulation / M. Safari, F. Hadi, M. Reza, H. Sheikhi // Entropy. – Vol. 16, Issue 10 (2014). – Pp. 5159-5177.

7. Sakradzija M. Fluctuations in a quasi-stationary shallow cumulus cloud ensemble / M. Sakradzija, A. Seifert, T. Heus // Nonlinear Processes in Geophysics Discussions. – Vol. 1, Issue 2 (2014). – Pp. 1223-1282.
 8. Brechler J. Impact of Noise Barriers on Air-Pollution Dispersion / J. Brechler, V. Fuka // Natural Science. – Vol. 06, Issue 06 (2014). – Pp. 377-386.
 9. Harris J.C. Large eddy simulation of sediment transport over rippled beds / J.C. Harris, S.T. Grilli // Nonlinear Processes in Geophysics Discussions. – Vol. 1, Issue 1 (2014). – Pp. 755-801.
 10. Niedoba P. On stochastic inlet boundary condition for unsteady simulations / P. Niedoba, M. Jícha, L. Čermák // EPJ Web of Conferences. – Vol. 67 (2014). – Pp. 02082.
 11. 3D Simulation of Flow over a Triangular Broad-Crested Weir / Seyed hooman hoseini // Journal of River Engineering. – Vol. 2, Issue 2 (2014). – Pp. 22-28.
 12. Shamsoddin S. Large Eddy Simulation of Vertical Axis Wind Turbine Wakes / S. hamsoddin, F. Porté-Agel // Energies. – Vol. 7, Issue 2 (2014). – Pp. 890-912.
 13. Xu L. Land Ecological Security Evaluation of Guangzhou, China / Xu L., H. Yin, Z. Li, S. Li // International Journal of Environmental Research and Public Health. – Vol. 11, Issue 10 (2014). – Pp. 10537-10558.
 14. Cossens R. CATIA V5 Workbook. R. 19 / R. Cossens // Cedar City USA: Southern Utah University: SDC Publications, 2009. – 500 p.
 15. Jian-Xiang Z. Study on the Flow of Particle Agglomerates in Desulfurization Tower / Z. Jian-Xiang, X. Chun-Xing, Z. Wei-Ling // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – Vol. 7, Issue 2 (2014). – Pp. 282-289.
 16. Maché M. From meso-scale to micro scale LES modelling: Application by a wake effect study for an offshore wind farm / M. Maché, H. Mouslim, L. Mervoyer // ITM Web of Conferences. – Vol. 2 (2014). – Pp. 01004.
 17. Shih R.H. Learning SolidWorks 2014 / R.H. Shih, K. Falls // USA, SDC Publications, 2013. – 500 p.
 18. Tran P. SolidWorks 2013. Part I – Basic Tools, Parts, Assemblies and Drawings / P. Tran // USA, SDC Publications, 2013. – 620 p.
 19. Tran P. SolidWorks 2013. Part II – Advanced Techniques / P. Tran // USA, SDC Publications, 2013. – 650 p.
 20. Collette B. FreeCAD [how-to]: Solid Modeling With the Power of Python / B. Collette, D. Falck // Birmingham : Packt Pub., 2012. – 70 p.

Гумен Е.Н., Приймак А.В., Милейковський В.А. Аналіз макроструктури вентиляційних струй с использованием САПР для параметрического моделирования

Предложен усовершенствованный подход к аналитическому расчету угла расширения вентиляционных турбулентных струй. Этот угол является фундаментальной экспериментальной константой струйных течений. Показана возможность выполнения геометрического анализа макроструктуры вентиляционных струй с помощью САПР для параметрического моделирования, что экономит до 90 % рабочего времени исследователя без потери точности результатов. При этом может быть использовано бесплатное САПР для параметрического моделирования (например, FreeCAD). Поэтому дополнительные вложения средств в программное обеспечение не обязательны. Получено значение тангенса угла расширения, которое повторяет общеизвестные экспериментальные данные.

Ключевые слова: турбулентная струя, вентиляционная струя, параметрическое моделирование, макроструктура турбулентной струи.

Gumen O.M., Priymak O.V., Mileikovskiy V.O. The Analysis of Turbulent Ventilation Jet Using CAD for Parametric Modelling

An improved approach to the analytical calculation of the turbulent ventilation jet expansion angle is offered. This angle is a fundamental experimental constant of the jets. The possibility of the geometric analysis of the ventilation jet macrostructure using CAD software for parametric modelling, which saves up to 90 % of the research time without loss of the result accuracy, is shown. It is possible to use free of charge CAD software for parametric modelling (for example FreeCAD). So the additional investment in software is not required. The obtained value of tangent of the jet expansion angle follows the known experimental data.

Key words: turbulent jet, ventilation jet, parametric modelling, turbulent jet macrostructure.