

9. Mell, P. M., Grance, T. (2011). The NIST Definition of Cloud Computing. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. NIST. doi: 10.6028/nist.sp.800-145

10. Ahuja, S. P., Mani, S., Zambrano, J. (2012). A Survey of the State of Cloud Computing in Healthcare. Network and Communication Technologies, 1 (2). doi: 10.5539/nct.v1n2p12

Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Лебедєв О. В.
Дата надходження рукопису 18.05.2016

Шилов Микита Юрійович, кафедра біомедичної кібернетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: sevnikita@gmail.com

Антонова-Рафі Юлія Валеріївна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра біомедичної кібернетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: unes04@mail.ru

УДК 536.24:533.6.011

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.71691

АЕРОДИНАМІЧНИЙ ОПІР ДВОХ ПОРУЧ РОЗТАШОВАНИХ ТРУБ РІЗНОЇ ФОРМИ

© О. М. Терех, О. І. Руденко, Ю. В. Жукова, В. А. Рогачов, О. В. Баранюк

Приведені результати експериментального дослідження аеродинамічного опору двох поруч розташованих труб різної форми поперечного перерізу в діапазоні зміни чисел Рейнольдса від 4000 до 16000. Виконано порівняння отриманих даних. Встановлено, що труби краплеподібної форми мають менший опір, а труби плоскоовальної і гантелеподібної форми мають більший опір в порівнянні з опором труб круглого поперечного перерізу

Ключові слова: труба, круглий, краплеподібний, плоскоовальний, гантелеподібний, аеродинаміка, опір, дослідження, порівняння

Experimental investigations of aerodynamic drag from two tubes in side-by-side arrangement for different tube shapes in the range of Reynolds numbers from 4000 to 16000 are performed. Comparison of experimental data is executed. It is set, that the tubes of drop-shaped form have less aerodynamic drag and the tubes of flat-oval and dumb-bell forms have greater drag as compared to drag of circular tubes

Keywords: tube, circular, drop-shaped, flat-oval, dumb-bell, aerodynamics, drag, investigation, comparison

1. Вступ

Рекуперативні трубчасті теплообмінні апарати, які виконані з круглих труб знайшли своє широке застосування в різних галузях промисловості. Це поверхні нагріву котлоагрегатів (повітрянагрівачі, калорифери, пароперегрівачі), елементи теплообмінників АЕС, регенераторів-повітрянагрівачів ГТУ і ін. Але, практика використання круглих труб показала, що труби круглого перерізу з точки зору поліпшення їх теплоаеродинамічних характеристик, на сьогоднішній день себе вичерпали і не дозволяють збільшити теплову ефективність і зменшити масо-габаритні показники теплообмінного устаткування. В той же час результати досліджень профільованих труб (плоскоовальних, краплеподібних, еліптичних) [1–5] свідчать про те, що такі труби мають в 1,5...2 рази менший аеродинамічний опір ніж труби круглої форми при близьких теплопередавальних характеристиках і, відповідно, більш високу теплоаеродинамічну ефективність, що дозволяє досягти високої компактності і зменшення металоемності теплообмінного

устаткування.

Проте однією з головних причин, яка стримує використання профільованих труб в конструкціях теплообмінних поверхонь – це відсутність напрацьованих в області вивчення особливостей процесів теплообміну і аеродинаміки, особливо труб краплеподібного і двох кутового профілю, і найголовніше – відсутність критеріальних рівнянь для визначення коефіцієнтів теплообміну і аеродинамічного опору таких поверхонь.

Дана робота присвячена експериментальному дослідженню аеродинамічного опору двох труб різного поперечного перерізу, встановлених поруч у вузькому закритому каналі при їх куті атаки повітряним потоком 0° .

2. Мета і задачі дослідження

Мета роботи – отримання нових експериментальних даних по впливу на аеродинамічний опір двох труб різного профілю, розташованих поруч у вузькому каналі при куті атаки їх повітряним потоком 0° .

Завдання досліджень:

1. Провести експериментальні дослідження і отримати дослідні дані з аеродинамічного опору для двох поруч встановлених в каналі труб різного профілю.

2. Визначити вплив форми труб та їх взаємну орієнтацію в каналі на аеродинамічний опір.

3. Аналіз літературних джерел

Дослідженням аеродинамічного опору труб і пакетів з профільованих труб присвячена невелика кількість робіт. Відомі дослідження в більшості своїй містять результати порівняння поодиноких труб еліптичної і круглої форми і направлені в основному на вивчення впливу геометрії профілю труб на їх теплоаеродинамічні характеристики [1, 3, 5–9].

У роботі [8] представлені дослідження полів тиску по контуру поодиноких циліндрів кулачкового типу (cam-shaped cylinders) близьких до краплеподібної форми в діапазоні чисел Рейнольдса $Re=15000...48000$ при кутах атаки φ від 0° до 360° . Показано, що залежність коефіцієнта опору C_D від кута атаки носить немонотонний характер: локальні мінімуми спостерігаються при кутах атаки профілю 30° , 180° і 330° ; локальні максимуми при кутах 90° і 270° .

Візуалізація димом (smoke visualization) обтікання поодиноких труб кулачкового профілю представлена в роботі [9]. Отримані картини обтікання внаслідок не перпендикулярності розташування фотокамери до об'єкту дослідження, набули викривлений вигляд, що ускладнює їх порівняння і аналіз. На приведених фотографіях практично не спостерігається ніякої різниці в обтіканні труби при різних кутах повороту її до набігаючого потоку.

У дослідженнях [10, 11] за допомогою числового моделювання вивчався вплив поперечної і по-

довжньої відстані між двома циліндрами краплеподібної форми на інтенсивність теплообміну і втрати тиску. Моделювання проведене для циліндрів, які розташовані малим діаметром d до потоку в діапазоні зміни чисел Рейнольдса Re від 50 до 300. Результати, які представлені у вигляді залежностей $C_D=f(Re)$ і $Nu=f(Re)$, показали, що коефіцієнти втрат тиску для другого по ходу потоку циліндра у 2...4 рази менший, ніж для першого. Із збільшенням чисел Рейнольдса коефіцієнт опору знижується. Зменшення відносного поперечного кроку між двома циліндрами від 3 до 1 призводить до зниження інтенсивності теплообміну на 30...35 %.

Аналіз приведеної інформації дозволяє зробити наступні висновки:

1) дослідження впливу геометричних характеристик профільованих труб і кроків між ними на їх теплоаеродинамічні характеристики практично відсутні;

2) відомі роботи містять уривчасті дані, не мають практично ніяких розрахункових співвідношень;

3) результати числового моделювання експериментально не підтверджені.

4. Методика і об'єкт досліджень

Дослідження аеродинамічного опору двох поруч розташованих труб різної форми поперечного перетину, які розміщувалися у вузькому каналі, проведені в аеродинамічній трубі розімкненого типу прямокутного перетину [12] шириною $B=70$ мм і висотою $A=60$ мм за методиками, детально викладеними в [3]. Для досліджень вибрано чотири форми труб висотою $h=60$ мм з однаковим більшим діаметром $D=24$ мм: круглі труби, плоскоовальні, гантелеподібні і краплеподібні (рис. 1–3). Малий діаметр d краплеподібних труб складав 10 мм. Величина пережиму гантелеподібних труб – $c=18$ мм.

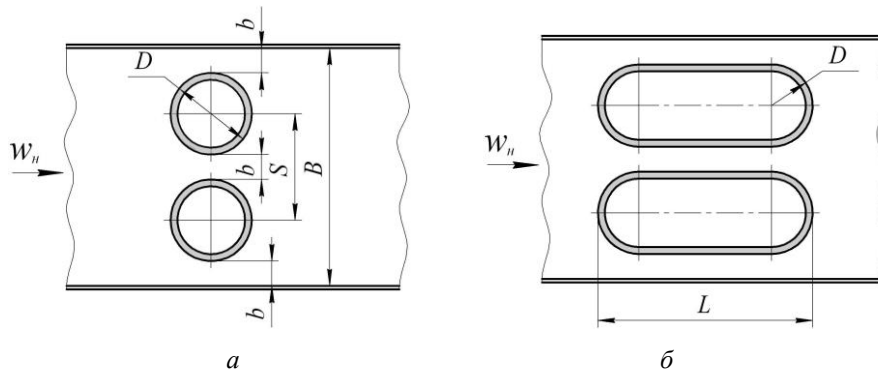


Рис. 1. Розміщення труб в каналі: а – круглої форми; б – плоскоовальної форми

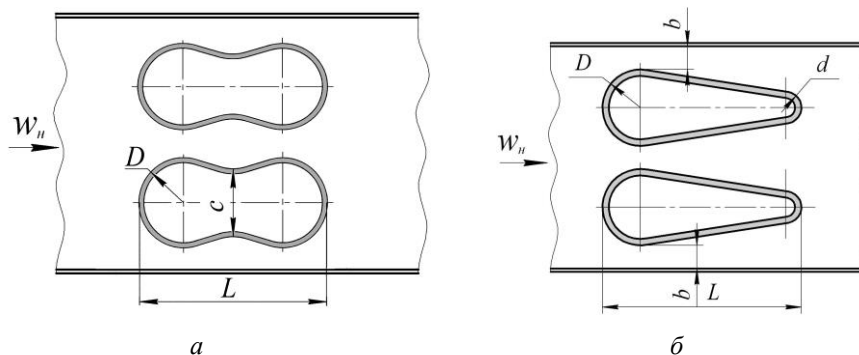


Рис. 2. Розміщення труб в каналі: а – «гантелеподібної» форми; б – «прямої» краплеподібної форми

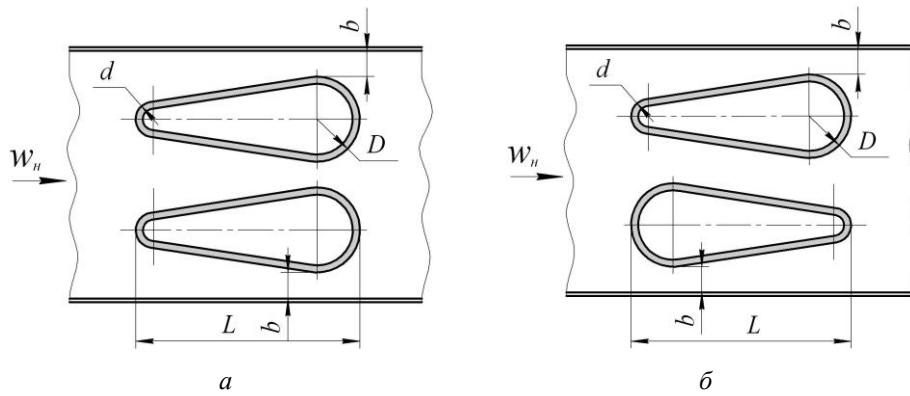


Рис. 3. Розміщення краплеподібних труб в каналі: а – «зворотної» форми; б – «змішаної» форми

Крок між трубами S , зазор b між ними і стінками робочої ділянки (окрім труб «змішаної» краплеподібної форми), а також подовження профілю L для всіх труб приймалися постійними і рівними 31,3; 7,3 і 51 мм відповідно. Втрати тиску ΔP визначалися за різницею статичного тиску до і після труб з урахуванням втрат на тертя у проточній частині стенду. По величинах перепадів ΔP визначалися числа Ейлера Eu :

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot W_n^2} \quad (1)$$

5. Результати досліджень

Дослідження аеродинамічного опору труб виконані в діапазоні чисел Рейнольдса $4000 < Re_H < 16000$, що відповідає інтервалу швидкостей у вільному (не захарашеному) поперечному перетині каналу робочої ділянки 2,5...10 м/с. За визначальний розмір в числах Рейнольдса приймався більший діаметр труб D . За розрахункову швидкість повітря в числах Re і Eu приймалася швидкість у вільному поперечному перетині каналу робочої ділянки. Для всіх форм труб коефіцієнт захарашування каналу k_q залишався величиною постійною ($k_q=0,69$), окрім труб «змішаної» краплеподібної форми, для яких $k_q=0,54$.

Результати досліджень представлені в логарифмічних координатах у вигляді залежностей $Eu=f(Re_H)$ на рис. 4. Експериментальні дані для всіх досліджуваних труб досить добре апроксимуються степеневими залежностями вигляду

$$Eu = C_s \cdot Re_H^{-n} \quad (2)$$

Звертає на себе увагу той факт, що значення показника степені n при числі Рейнольдса для всіх досліджуваних форм труб різний і змінюється практично від нуля (для труб круглої форми) до $-0,2$ (для труб «прямої» краплеподібної форми). Рівень аеродинамічного опору також різний, що можна пояснити відмінністю в характері їх обтікання.

Всі отримані результати (рис. 5) по опору труб різного профілю, які представлені на рис. 1–3, віднесені до опору труб круглого профілю.

Представлені на рис. 4, 5 дані показують, що труби плоскоовального і гантелеподібного профілю (рис. 1, б та рис. 2, а) мають на 10...30 % більший опір в порівнянні з трубами круглого поперечного

перерізу. Це може бути пояснено тим, що потік, потрапляючи у вузький канал між двома плоскоовальними трубами, різко прискорюється до максимальної швидкості на прямій ділянці і далі, після виходу з каналу між плоскоовальними трубами, швидкість різко знижується до значення, відповідного швидкості в незахарашеному трубами перерізі. Таким чином, поряд розташовані плоскоовальні труби створюють місцевий опір «входу-виходу» потоку, що і приводить до збільшення опору.

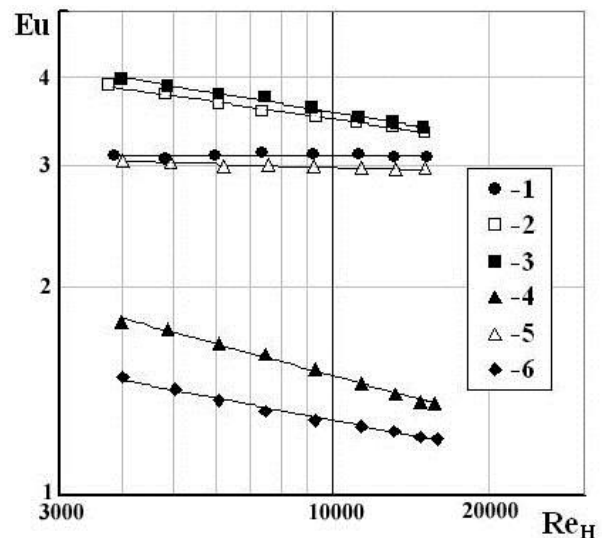


Рис. 4. Залежність чисел Ейлера від чисел Рейнольдса для труб різного профілю: 1 – круглі; 2 – плоскоовальні; 3 – гантелеподібні; 4 – краплеподібні «прямі»; 5 – краплеподібні «зворотної»; 6 – краплеподібні «змішані»

Канал між двома гантелеподібними трубами нагадує канал типу „дифузор-конфузор” з плавним входом та виходом. Для каналів такого типу характерним є більший аеродинамічний опір в порівнянні з гладкими каналами [13]. Тому опір труб «гантелеподібної» форми більший, ніж опір труб круглої і плоскоовальної форми (рис. 5).

При обтіканні труб „зворотної” краплеподібної профілю (рис. 3, а), які мають невеликий радіус закруглення в лобовій частині труби з переходом в пряму подовжену частину в каналі, що звужується, який сформований трубами, швидкість падає, росте тиск і гідра-

влічні втрати. Після відриву потоку в кормовій частині, краплеподібні труби обтікаються подібно круглим: течія характеризується різкою зміною тиску, зростанням швидкості потоку і має широкую рециркуляційну зону за кожною трубою. Проте всі характеристики менше по величині в порівнянні з круглими трубами. Тому аеродинамічний опір такого профілю труб не набагато нижче (на 3,4 %) чим у труб круглої форми.

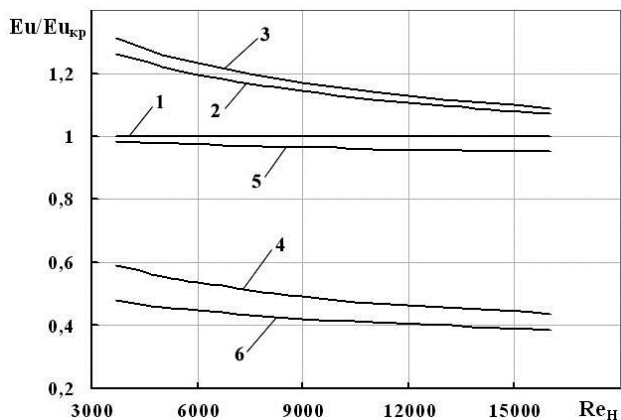


Рис. 5. Залежність відношення чисел Ейлера E_u профільованих труб до чисел Ейлера $E_{u,kr}$ круглих труб від чисел Рейнольдса Re_D : 1 – круглі труби; 2 – плоскоовальні; 3 – «гантелеподібні»; 4 – краплеподібні «прямі»; 5 – краплеподібні «зворотні»; 6 – краплеподібні «змішані»

Істотно нижчим аеродинамічним опором, в порівнянні з перерахованими вище формами труб, володіють труби „прямого” краплеподібного профілю (рис. 2, б). Лобова частина труб обтікається подібно до круглої труби. Потім потік входить в канал-дифузор, який утворено двома трубами, при цьому тиск росте і поступово падає швидкість. Відбувається видування потоку в ближній слід за трубою, відривна зона від обох труб зміщується вниз за потоком та має невеликі розміри [3], що приводить до падіння опору. Аеродинамічний опір такого розташування краплеподібних труб у 1,6...2 рази нижчий ніж для труб круглої форми. Підтвердженням отриманих результатів може бути публікація [14] в якій автор, встановивши в кормовій частині круглого циліндра тонку пластину певної довжини, отримав істотне (у 1,6 рази) зниження повного опору такої конструкції.

«Змішане» розташування труб краплеподібної форми характеризується значно меншим захараченням перетину робочого каналу ($k_q=0,54$) і, відповідно, більшою (у 1,45 рази) площею перетину для проходу потоку через перешкоду. Тому аеродинамічний опір такого не симетричного компонування труб виявився найнижчим в порівнянні зі всіма іншими розглянутими випадками розміщення труб. Втрати тиску для такого компонування краплеподібних труб у 2...2,5 рази менші, ніж у труб круглого перерізу (рис. 5).

6. Висновки

1. Отримані дані з аеродинамічного опору двох поруч розташованих труб різної форми свідчать про істотно нижчий аеродинамічний опір труб краплепо-

дібної форми «прямого» і «змішаного» розміщення в порівнянні з трубами «зворотного» краплеподібного, круглого, плоскоовального і гантелеподібного профілю поперечного перерізу.

2. Отримані дані можуть бути використані як методична основа для подальших досліджень, пов'язаних з оптимізацією геометричних розмірів труб та їх взаємним розташуванням в каналі.

Література

1. Hasan, A. A. Thermal-hydraulic performance of oval tubes in a cross-flow of air [Text] / A. A. Hasan // Heat and Mass Transfer, accepted for publication. THP 2004 by author and THP 2004 Springer-Verlag. By permission, 2004. – P. 1–32.

2. Кондратюк, В. А. Аэродинамическое сопротивление поперечно-омываемых шахматных пакетов плоскоовальных труб [Текст] / В. А. Кондратюк, В. Е. Туз, А. М. Терех, Ю. В. Жукова, А. Ж. Мейрис // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 3, № 8 (57). – С. 39–42. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/4074/3740>

3. Terekh, A. M. Aerodynamic drag to flows about drop-like tubes and visualization of these flows [Text] / A. M. Terekh, A. I. Rudenko, Y. V. Zhukova // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2013. – Vol. 86, Issue 2. – P. 378–384. doi: 10.1007/s10891-013-0844-9

4. Письменный, Е. Н. Конвективный теплообмен поперечно-омываемых шахматных пакетов плоскоовальных труб [Текст] / Е. Н. Письменный, В. А. Кондратюк, Ю. В. Жукова, А. М. Терех // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 2, № 8 (50). – С. 4–8. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/1829/1725>

5. Ota, T. Heat transfer and flow around an elliptic cylinder [Text] / T. Ota, H. Nishiyama, Y. Taoka // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1984. – Vol. 27, Issue 10. – P. 1771–1779. doi: 10.1016/0017-9310(84)90159-5

6. Жукова, Ю. В. Аэродинамика и теплообмен плоскоовального цилиндра при вынужденной конвекции. Т. 2 [Текст]: конференция / Ю. В. Жукова, А. М. Терех, А. В. Семеняко. – Москва, 2010. – С. 126–128.

7. Жукаускас, А. Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке жидкости [Текст] / А. Жукаускас, И. Жюгжда. – Вильнюс: Мокслас, 1979. – 240 с.

8. Nouri-Borujerdi, A. Drag of a single non-circular cylinder [Text] / A. Nouri-Borujerdi, A. M. Lavasani // The Eighteenth International Symposium on Transport Phenomena. – Daejeon, KOREA, 2007. – P. 2104–2108.

9. Nouri-Borujerdi, A. Flow visualization around a non-circular tube [Text] / A. Nouri-Borujerdi, A. M. Lavasani // IIE Transactions B: Applications. – 2006. – Vol. 19, Issue 1. – P. 73–82.

10. Lavasani, A. M. Heat transfer from two cam shaped cylinders in side-by-side arrangement [Text] / A. M. Lavasani, H. Bayat // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2012. – Vol. 6, Issue 7. – P. 1298–1301.

11. Lavasani, A. M. Flow around two cam shaped cylinders in tandem arrangement [Text] / A. M. Lavasani, H. Bayat // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2012. – Vol. 6, Issue 7. – P. 1319–1322.

12. Терех, О. М. Теплообмін поодиноких циліндрів краплеподібної форми в поперечному потоці [Текст] / А. М. Терех, А. В. Семеняко, А. И. Руденко, В. А. Кондратюк // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 1, № 8 (67). – С. 27–31. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/20066/19035>

13. Кирпиков, В. А. Исследование теплообмена и гидродинамического сопротивления канала типа диффу-

зор-конфузор [Текст] / В. А. Кирпиков, В. В. Гутарев, Н. М. Цирельман // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1969. – № 9. – С. 79–84.

14. Roshko, A. On the Drag and Frequency of Two-Dimensional Bluff Bodies [Text] / A. Roshko // National Advisory Committee for Aeronautics. Technical Note 3169. California Institut of Technology, Washington, 1954. – 29 p.

References

1. Hasan, A. A. (2004). Thermal-hydraulic performance of oval tubes in a cross-flow of air. Heat and Mass Transfer, accepted for publication. THP 2004 by author and THP 2004 Springer-Verlag. By permission, 1–32.

2. Kondratyuk, V. A., Tuz, V. E., Terekh, A. M., Zhukova, Yu. V., Meyris, A. J. (2012). Aerodynamic drag of transversal-streamlined staggered bundles of flat-oval tubes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/8 (57), 39–42. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/4074/3740>

3. Terekh, M., Rudenko, A. I., Zhukova, Y. V. (2013). Aerodynamic drag to flows about single drop-like tubes and visualizaton of these flows. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 86 (2), 378–384. doi: 10.1007/s10891-013-0844-9

4. Pis'menyi, E. N., Kondratyuk, V. A., Zhukova, Y. V., Terekh, A. M. (2011). Convective heat exchange of cross-section-washed staggered packages of plainly-oval tubes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2/8 (50), 4–8. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1829/1725>

5. Terukazu, O., Hideya, N., Yukiyasu, T. (1984). Heat transfer and flow around an elliptic cylinder. International Journal of Heat and Mass Transfer, 27 (10), 1771–1779. doi: 10.1016/0017-9310(84)90159-5

6. Zhukova, Yu. V., Terekh, A. M., Semenyako, A. V. (2010). Aerodynamics and heat transfer of flat oval cylinder at the forced convection. Vol. 2. Moscow, 126–128.

7. Zhukauskas, A., Ziugzda, J. (1979). Heat transfer of cylinder in cross flow of fluid. Vilnius: Mokslas, 240.

8. Nouri-Borujerdi, A., Lavasani, A. M. (2007). Drag of a single non-circular cylinder. The Eighteenth International Symposium on Transport Phenomena. Daejeon, KOREA, 2104–2108.

9. Nouri-Borujerdi, A., Lavasani, A. M. (2006). Flow visualization around a non-circular tube. IJE Transactions B: Applications, 19 (1), 73–82.

10. Lavasani, A. M., Bayat, H. (2012). Heat transfer from two cam shaped cylinders in side-by-side arrangement. World Academy of Science, Engineering and Technology, 6 (7), 1298–1301.

11. Lavasani, A. M., Bayat, H. (2012). Flow around two cam shaped cylinders in tandem arrangement. World Academy of Science, Engineering and Technology, 6 (7), 1319–1322.

12. Terekh, A. M., Semenyako, A. V., Rudenko, A. I., Kondratyuk, V. A. (2014). Heat transfer of a single drop shaped cylinders in cross flow. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1/8 (67), 27–31. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/20066/19035>

13. Kirpikov, V. A., Gutarev, V. V., Tsyrelman, N. M. (1969). Research of heat transfer and hydrodynamic drag of channel of type diffuzor-contractor. News of higher educational establishments. Energy, 9, 79–84.

14. Roshko, A. (1954). On the Drag and Frequency of Two-Dimensional Bluff Bodies. National Advisory Committee for Aeronautics. Technical Note 3169. California Institut of Technology, Washington, 29.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Черноусенко О. Ю.
Дата надходження рукопису 16.05.2016*

Терех Олександр Михайлович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: teram57@meta.ua

Руденко Олександр Ігоревич, кандидат технічних наук, доцент, кафедра економіки і підприємництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: a_rudenko55@mail.ru

Жукова Юлія Володимирівна, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Лабораторія турбулентності, Інститут тепло- і масообміну ім А. В. Ликова НАН Білорусії, вул. П. Бровки, 15, м. Мінськ, Білорусь, 220072
E-mail: julia_zhukova@rambler.ru

Рогачов Валерій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: valeriy_rogachov@ukr.net

Баранюк Олександр Володимирович, кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: aleksandr@i.ua