

© Р.В. Неїло

В.О. Туз

д-р техн. наук

Національний технічний

університет України

«Київський політехнічний  
інститут»

## Дослідження вільної конвекції в теплообмінних поверхнях підігрівачів газу

УДК 536.24

У роботі представлено результати візуалізації омивання горизонтального циліндра, який розміщено в вертикальному каналі, в умовах вільної конвекції при  $Ra = 1,3 \cdot 10^5$ . Отримані дані зіставлено з даними інших авторів та результатами досліджень інтенсивності теплообміну в тих же умовах у діапазоні  $9,1 \cdot 10^3 < Ra < 1,7 \cdot 10^5$ . Результати візуалізації гідродинаміки підтверджують та обґрунтовують характер зміни інтенсивності тепловіддачі. Аналіз точки відриву димового струменя вказує на приблизну рівність виштовхувальних сил та сил інерції в умовах проведення експерименту.

**Ключові слова:** теплообмін, вільна конвекція, горизонтальна труба, вертикальний канал, затиснені умови.

В работе представлены результаты визуализации омывания горизонтального цилиндра, размещенного в вертикальном канале, в условиях свободной конвекции при  $Ra = 1,3 \cdot 10^5$ . Полученные данные сопоставляются с данными других авторов и результатами исследования интенсивности теплообмена в тех же условиях в диапазоне  $9,1 \cdot 10^3 < Ra < 1,7 \cdot 10^5$ . Результаты визуализации гидродинамики подтверждают и обосновывают характер изменений интенсивности теплообмена. Анализ точки отрыва дымовой струи указывает на примерное равенство выталкивающих сил и сил инерции в условиях проведения эксперимента.

**Ключевые слова:** теплообмен, свободная конвекция, горизонтальная труба, вертикальный канал, зажатые условия.

This paper presents the results of visualization of mass transfer around horizontal cylinder confined in a vertical channel, during free convection. The results are compared with the data of other authors, and the results of the previous study on heat transfer rate in the range of Rayleigh numbers  $9,1 \cdot 10^3 < Ra < 1,7 \cdot 10^5$ . The obtained results explain the changes in nature convective heat transfer. The analysis of smoke separation point indicates that buoyant forces and inertial forces are approximately equal in the visualization experiment conditions.

**Key words:** heat transfer, free convection, horizontal cylinder, vertical channel.

Промисловий підігрівач газу являє собою жаротрубно-димогарний котел, який використовує природний газ як паливо. У конструкції підігрівача виділяють горизонтальний пучок труб, на поверхні якого відбувається теплообмін в умовах вільної конвекції, для якого не існує однозначної методики визначення інтенсивності тепловіддачі, а розрахунок за наявними залежностями призводить до значних нев'язок теплового балансу [1]. Пошук можливого пояснення такої теплогідравлічної картини передусім потрібно шукати у впливові пучка труб, що створює потужний тепловий слід над собою та може викликати значно інтенсивніший рух теплоносія порівняно з умовами горизонтального циліндра у великому об'ємі. На першому етапі дослідження можливе вивчення впливу умов затиснення горизонтального циліндра бічними стінками вертикального каналу. З огляду

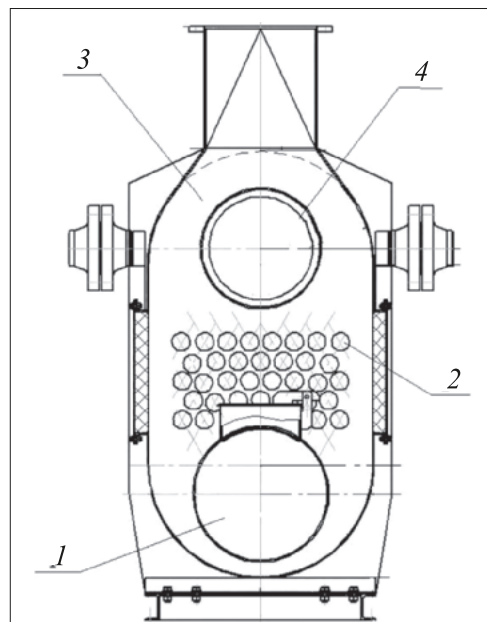
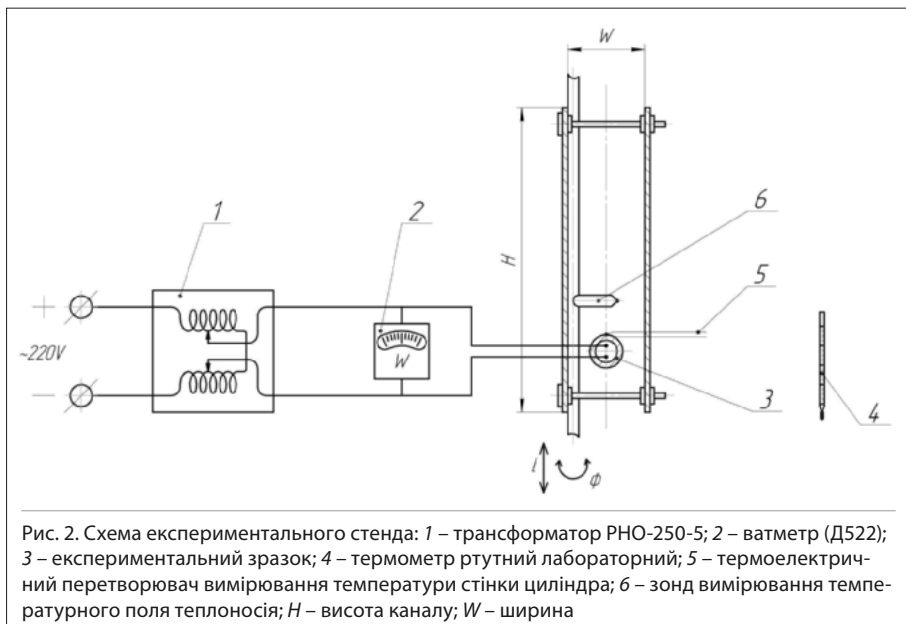


Рис. 1. Промисловий підігрівач газу ПГ:  
1 – жаротрубна топкова камера; 2 – димогарний конвективний пучок; 3 – «водяна сорочка»; 4 – поверхня теплообміну для підігріву газу

на гідродинамічну складову задачі, таке затиснення певною мірою відображає характер руху теплоносія через пучок труб. Щодо теплової складової, то затиснутий у горизонтальному каналі циліндр дає можливість дослідити поведінку лише зразка, певним чином абстрагуючись від впливу сусідніх горизонтальних теплообмінних поверхонь. Першим на шляху до повномасштабного експериментального дослідження циліндрів у пучку потрібно зробити саме такий крок, адже завдяки цьому зможемо закласти підґрунтя для створення розрахункової методики визначення інтенсивності теплообміну пучків горизонтальних труб, що входять до складу димогарної частини промислового підігрівача газу, представленого на рис. 1.

Інтенсифікація теплообміну на різному роду поверхнях, включаючи горизонтальні циліндри, завжди залишається актуальним завданням.



При цьому особливо важливою є така робота в області низьких значень коефіцієнтів тепловіддачі, що характерні для теплообміну вільною конвекцією. Підвищення інтенсивності теплообміну, отримане у результаті проведення експериментальної роботи, потребує відповідного аналізу та пояснення з метою визначення інструментів впливу на досліджуваний процес, оптимального значення поліскладових залежностей, а також допустимих діапазонів використання результатів роботи тощо. Візуалізацію як інструмент виявлення непомітного впливу різних факторів часто використовують для дослідження явищ гідродинаміки.

У [2] описано результати експериментальних досліджень теплообміну на поверхні горизонтального циліндра, що розміщений уздовж вертикальної поздовжньої площини симетрії у вертикальному каналі. У роботі показано підвищення інтенсивності тепловіддачі від циліндра порівняно із інтенсивністю теплообміну від одиночного циліндра у великому об'ємі [3].

І хоча в [2] представлено якісну картину перебігу процесу, наведені висновки потребують додаткового підтвердження. Аналогічні дані отримано в [4–7] для інших діапазонів чисел Релея, проте в цих роботах не наведено жодних наочних підтверджень зафіксованих змін в інтенсивності тепловіддачі в отриманих результатах. Подібні висновки можна зробити й про [8], де, незважаючи на застосування інтер-

ферометра Маха-Зендера, не показано відповідних змін у гідродинаміці теплоносія, хоча саме вони є передумовою зміни інтенсивності тепловіддачі в різного роду умовах.

У роботі [9, 10] представлено результати димової візуалізації динамічного поля, що виникає навколо горизонтального циліндра у великому об'ємі. Спираючись на результати цього дослідження, проаналізуємо отримані показники з димової візуалізації гідродинаміки під час теплообміну вільною конвекцією на поверхні горизонтального циліндра, розміщеного в вертикальному каналі.

#### Експериментальна установка

Експериментальний зразок, який використовували під час проведення досліджень, детально описано в [3].

Експериментальну установку детально зображено в [2] та на рис. 2. Для димової візуалізації в бічних стінках стенда зроблено додаткові плоскоовальні щілини, в області розміщення яких є два джерела світла – люмінесцентні лампи, закриті світлонепроникними кожухами.

#### Результати експериментальної роботи

Відповідно до [9, 10], динамічне поле навколо холодного та гарячого циліндрів, що знаходяться у великому об'ємі, зображено на рис. 3.

Для наочного відображення впливу гарячого циліндра на гідродинаміку оточуючого теплоносія, аналогічно до [9, 10], зроблено фотознімки як на холодному, так і гарячому зразках. На рис. 4, *a* зображено результати візуалізації динамічного поля на холодному зразку, затисненому у вертикальному каналі. Помітно, що значних відмінностей у результатах омивання практично немає. Струмінь диму рухається практично по лінійній траєкторії в області його підведення поза горизонтальними габаритами циліндра та відривається від нього приблизно одразу за міделевим перетином під час підведення в області ширини циліндра. Єдина відмінність, яку можна виділити, – під час підведення струменя диму приблизно на вертикальній площині симетрії зразка та його активного розмивання по бічній поверхні циліндра, а також утворення підковоподібного шару бічні стінки дещо стискають отриману «підкову». Отже, можемо констатувати, що омивання холодного зразка, що знаходиться в вер-

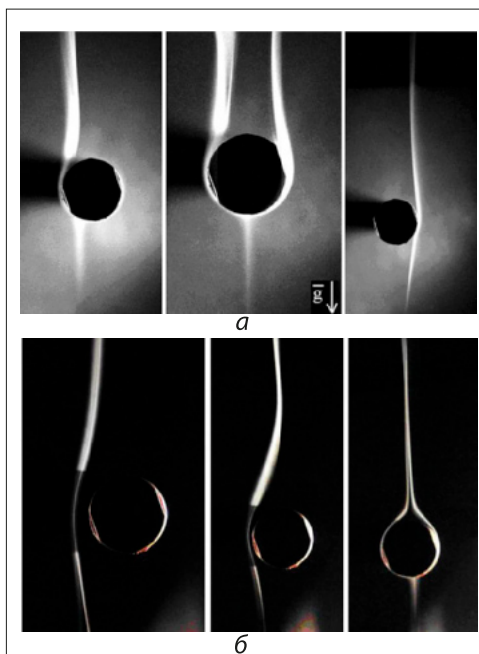


Рис. 3. Візуалізація динамічного поля навколо горизонтального циліндра, що занурено у великий об'єм [9, 10]: *a* – на холодному зразку; *б* – на гарячому зразку

тикальному каналі, практично не відрізняється від такого в умовах великого об'єму.

Принципово інша картина спостерігається на результатах роботи з гарячим зразком. Нагрітий під час теплообміну теплоносії завдяки механічному переносу та теплопровідності газу займає всю площу перетину каналу. Завдяки суцільному заповненню живого перетину гарячим теплоносієм рух у каналі має однозначний напрямок та загалом ознаки вимушено-конвективного: над поверхнею труби утворюється застійна зона, у якій можливі поява двох симетричних вихорів, а також їх періодичне нарощування та відрив. На рис. 4, б представлено результати усереднених у часі результатів візуалізації – за збільшених витримок фотокамери (до 0,5 с), а на рис. 4, в – результати миттєвих картин омивання.

Із рис. 4, б помітно, що картина омивання за наявності стінок каналу значно відрізняється від омивання одиночного циліндра в умовах великого об'єму (рис. 3, б). Наявність стінок каналу викликає інтенсивний рух теплоносія по всьому живому перерізу. В зв'язку з таким характером руху в кормовій частині циліндра утворюється зона, у якій практично відсутній рух теплоносія. З рис. 4, в можна помітити, що в цю неомивну зону періодично затягується частина теплоносія у вигляді нестійких вихорів, які швидко відриваються. Тут ми бачимо результати миттєвих картин омивання. Такі риси відривного руху, що має симетричний характер відносно вертикальної площини, характерні для вимушеного руху за невисоких чисел Рейнольдса. З аналізу результатів проведених візуалізаційних експериментів та даних, представлених у [11], можна констатувати високу відповідність отриманих результатів якісній картині перебігу процесу [2].

Для додаткового обґрунтування висновків стосовно помітного впливу вимушеного руху актуальною є спроба визначення впливу масових сил (зокрема, інерції). У такому випадку, вважаючи, що процес проходить в умовах змішаної конвекції («зовнішньою» рушійною силою якого є архімедова сила, прикладена до об'єму гарячого теплоносія), звернемося до [12], де авторами досліджено омивання та теплообмін одиночного циліндра в умовах змішаної конвекції для випадків однонаправленого, різнонаправленого та перехресного напрямків руху різних (вимушено- та вільноконвективної) швидкості. Для зіставлення результатів розглянемо випадок однонаправленого руху.

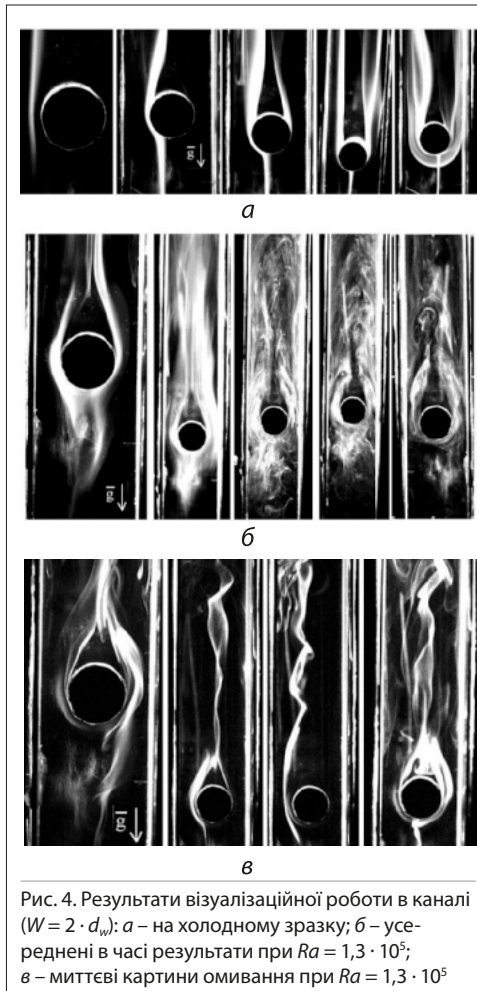


Рис. 4. Результати візуалізаційної роботи в каналі ( $W = 2 \cdot d_w$ ): а – на холодному зразку; б – усереднені в часі результати при  $Ra = 1,3 \cdot 10^5$ ; в – миттєві картини омивання при  $Ra = 1,3 \cdot 10^5$

На рис. 4, б та в можна помітити, що загалом кут відриву потоку лежить у діапазоні  $115^\circ$ – $130^\circ$ , що відповідно до даних [12] вказує на приблизну рівність підйомних сил та сил інерції. Таким чином, в умовах проведення візуалізаційного експерименту ( $Ra = 1,3 \cdot 10^5$ ,  $W = 2 \cdot d_w$ , де  $d_w$ , м – діаметр циліндра експериментального зразка) у каналі утворюється режим руху, що характерний для змішаної конвекції та викликаний заповненням гарячим теплоносієм каналу, дією на нього архімедової сили та подальшим виникненням самотяги в каналі.

### Висновки

Представлені в роботі результати візуалізації гідродинаміки одиночного горизонтального циліндра, затисненого в вертикальному каналі в умовах вільної конвекції, дають можливість зробити такі висновки: наявність вертикальних стінок каналу значною мірою впливає на рух теплоносія навколо циліндра; характер такого руху носить ознаки вимушеного руху, про що свідчать наявність застійної області за циліндром та наявність у ній вихрових структур; аналіз точки відриву теплоносія від поверхні циліндра вказує на приблизну рівність виштовхувальних сил та сил інерції під час теплообміну в описаних умовах, в зв'язку з чим такі умови більшою мірою можна віднести до змішаної конвекції; зміна характеру руху теплоносія є причиною підвищення інтенсивності теплообміну, що спостерігається за таких умов.

### Список літератури

1. Туз В.О. Конвективний теплообмін на зовнішній стороні гладкотрубних поверхонь [Текст] / В.О. Туз, Р.В. Неїло // Технологічний аудит и резервы производства. – 2013. – № 5/1 (3). – С. 19–23.
2. Неїло Р.В. Експериментальне дослідження інтенсивності тепловіддачі в умовах вільної конвекції від горизонтального циліндра в щільовому вертикальному каналі [Текст] / Р.В. Неїло // Вісник Львівської політехніки. – 2014. – № 1/52. – С. 9–13.
3. Туз В. О. Експериментальне дослідження теплообміну в умовах вільної конвекції на поверхні горизонтального циліндра [Текст] / В. О. Туз, Р. В. Неїло // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 6. – С. 17–23.
4. Marsters C. F. Natural convective heat transfer from a horizontal cylinder in the presence of nearby walls [Текст] / C. F. Marsters // The Canadian journal of chemical engineering. – 1975. – V. 53, issue 1. – Pp. 144–149.
5. Bakhtier F. Natural and mixed convection heat transfer around

- a horizontal cylinder within confining walls [Текст] / F. Bakhtier, I.G. Selcuk // Numerical Heat Transfer. – 1982. – Vol. 5. – Pp. 329–341.
6. **Sadegh Sadeghipour M.** Natural convection from a confined horizontal cylinder: the optimum distance between the confining walls [Текст] / M. Sadegh Sadeghipour, Y. Pedram Razi // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2001. – № 44. – Pp. 367–374.
7. **Hayati M.** Prediction of natural convection heat transfer from a confined horizontal elliptic tube using radial basic function network [Текст] / M. Hatati, A. Baharak, Maysam A. // International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences. – 2010. – Vol. 2, Issue 1. – Pp. 17–25.
8. **Harsini I.** Effect of adiabatic wall on the natural convection heat transfer from a wavy surface created by attached horizontal cylinders [Текст] / I. Harsini, M. Ashjaee // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2010. – Vol. 34, Issue 6. – Pp. 666–676.
9. **Неїло Р.В.** Експериментальне дослідження гідродинаміки та теплообміну в умовах вільної конвекції [Текст] / Р.В. Неїло // Технологический аудит и резервы производства: тези науково-практичної конференції «Наукові підсумки 2013», грудень 2013. – Харків, 2013. – № 6/5 (14). – С. 31–33.
10. **Неїло Р.В.** Димова візуалізація динамічного поля при теплообміні вільною конвекцією на поверхні горизонтального циліндра [Текст] / Р.В. Неїло // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – № 1/1(15). – С. 10–14.

11. **Van Dyke M.** An album of fluid motion [Текст] / M. Van Dyke. – The Parabolic Press. Stanford California, 1982. – 184 p.
12. **Kitamura K.** Heat transfer of combined forced and natural convection from horizontal cylinder to air [Текст] / K. Kitamura, K. Mototani, F. Kitamura // Heat Transfer – Asian Research. – 2007. – V. 36, issue 8. – Pp. 474–488.

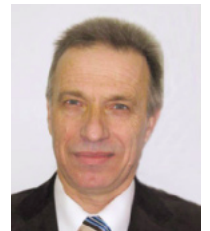
## Автори статті

**Неїло Роман Володимирович**

Аспірант кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут». Коло наукових інтересів: вільна конвекція, теплообмін, теплопередача.

**Туз Валерій Омелянович**

Доктор технічних наук, професор кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут». Коло наукових інтересів: вільна конвекція, теплообмін, теплопередача, масообмін.



## НОВИНИ

## Розпочато експлуатацію нового газового родовища біля берегів Великобританії

Компанія GDF SUEZ повідомила про початок розробки морського газового родовища Juliet, розташованого в Південному газовому басейні на віддалі 39 км на схід від берега Великої Британії. Поки що в експлуатації знаходиться одна свердловина, друга із запланованих бурінням розвідувальних свердловин буде введена найближчим часом. Свердловини даватимуть 2,3 млн м<sup>3</sup> на добу. З родовища газ транспортується трубопроводом протяжністю 22 км до платформи Pickerill A, а далі існуючим експортним трубопроводом до розташованого на суші терміналу Theddlethorpe. Родовище Juliet було відкрите GDF SUEZ E&P UK у грудні 2008 р.

*Pipeline & Gas Journal/ March 2014, p. 122*

## Контракт на постачання труб для Південного потоку

Компанія South Stream Transport B.V., штаб-квартира якої знаходиться в Амстердамі (Нідерланди), нещодавно підписала контракти на постачання 75 тис. т труб для першої ділянки морського газопроводу «Південний потік». Труби постачатимуть німецька компанія Europipe (50 % від всього обсягу) та United Metallurgical Company (35 %) і Северсталь (15 %). Загальна сума контракту становить 1 млрд євро.

Морська частина Південного потоку складатиметься з чотирьох ліній по 931 км кожна діаметром 813 мм та товщиною стінки труб у 39 мм. Труби, виготовлені зі сталі Х65 і запроектовані на максимальний робочий тиск 28,45 МПа, використовуватимуться для будівництва морської частини газової магістралі.

*Pipeline & Gas Journal/ March 2014, p. 16*