

*Шепель Анна Александровна, аспирант, кафедра обработки металлов давлением и материаловедения, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Криворожский металлургический институт, Украина.*

*Bereznoy Nikolay, State institution of higher education «Kryvyi Rih National University», Ukraine.*

*Chubenko Viktoriya, State institution of higher education «Kryvyi Rih National University», Ukraine.*

*Hinotskaya Alla, State institution of higher education «Kryvyi Rih National University», Ukraine.*

*Matsishyn Sergey, State institution of higher education «Kryvyi Rih National University», Ukraine, e-mail: sergej.macyshin@inbox.ru.*

*Shepel Anna, State institution of higher education «Kryvyi Rih National University», Ukraine, e-mail: anna.shepel@online.ua*

УДК 536.24

Неїло Р. В.

## ДИМОВА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ПРИ ТЕПЛОБМІНІ ВІЛЬНОЮ КОНВЕКЦІЄЮ НА ПОВЕРХНІ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛІНДРА

*В роботі представлено результати роботи з візуалізації ліній току теплоносія при теплообміні вільною конвекцією на поверхні горизонтального циліндра в умовах великого об'єму. Отримані результати дають змогу більш глибоко зрозуміти процеси та причини різного роду змін, що мають місце в описаному явищі.*

**Ключові слова:** теплообмін, вільна конвекція, горизонтальна труба, гідродинаміка, візуалізація.

### 1. Вступ

Теплогравітаційна конвекція — одне з найпоширеніших явищ на планеті. Воно виникає всюди у рідких середовищах, де існують нерівномірності температури серед окремих областей.

Візуалізація омивання тіл різного профілю завжди давало можливість не тільки більш глибокого розуміння суті досліджуваних явищ, а й часом підштовхувало до висновків, підтвердження яким дослідники знаходили значно пізніше. Не зважаючи на широке поширення математичного моделювання, фізичний експеримент, як і раніше, залишається основним способом кількісного підтвердження результатів розрахунку чи якісного підтвердження відповідності прийнятих припущень та гіпотез.

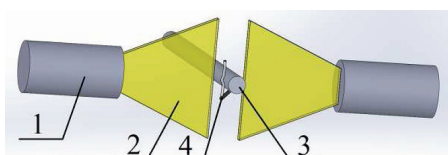
Ґрунтовний аналіз існуючих способів візуалізації представлено в [1]. В інших джерелах можна зустріти результати візуалізації різними способами картин омивання різного роду поверхонь [2–4]. В [5] представлено результати димової візуалізації теплообміну вільною конвекцією на поверхні вертикальної та вертикальної оребреної стінки.

В умовах вільної конвекції, динамічне та теплове поле повністю взаємопов'язані. Тому, візуалізація картини омивання, дає змогу зрозуміти не тільки суто динамічні явища (точки відриву потоку, природу гідравлічного опору, тощо), а й зробити ряд припущень щодо теплової сторони задачі (товщини теплового пограничного шару, температурний профіль сліду, що може розвиватися на значних відстанях за тілом, та інше).

### 2. Візуалізаційна установка

Експериментальна ділянка представляє собою алюмінієву трубу круглого перерізу, зовнішнім діаметром

Ø 22 мм. В середині труби розміщено електронагрівач. Детально експериментальний стенд та методика проведення експериментальної роботи з дослідження інтенсивності тепловіддачі описано в [6]. Для проведення візуалізаційних експериментів, експериментальний стенд, описаний в [6] дообладнано двома джерелами плоских пучків світла, та димогенератором. Схематично візуалізаційний стенд зображено на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема експериментального стенду: 1 — світлопропускний канал розміщення джерела світла; 2 — плоский пучок світла; 3 — експериментальний зразок; 4 — димогенератор з умовним струменем диму

Лампа накаливання потужністю 25 Вт, розміщено в циліндричному світлопропускному чохлах. В кришці торцевої поверхні розміщено прямокутний отвір, для отримання на виході плоского пучка світла. Джерела світла розміщено з двох протилежних сторін від експериментального зразка, на відстані, що значно перевищує розміри теплового та динамічного шару, що визначені в [6]. Фіксування картини омивання проводилося шляхом фотозйомки. Для підвищення контрастності отримуваних фотографій, необхідно максимально зменшити інтенсивність паразитного світла як від природних джерел, так і від штучних. Фотоапарат розміщувався перпендикулярно площині розповсюдження світла осесиметрично з експериментальним зразком.

Суть методу полягає у введенні в динамічний шар, що існує навколо горизонтального нагрітого циліндра,

струменя диму, який має ламінарну структуру та рухається вздовж уявної прямої (яка, паралельна з вектором сили тяжіння) з невеликою власною швидкістю. При невисокій власній температурі димового струменя, траєкторія такого руху буде повністю підпорядковуватися лініям току, що утворюються навколо нагрітого тіла.

Дим для проведення експерименту отримувався шляхом тління органічного твердого матеріалу. При цьому, температура отриманого диму природньо відмінна від температури оточуючого середовища. Мінімізація впливу самостійного руху димового струменя досягалася шляхом розміщення димогенератора на достатній для охолодження диму відстані. З іншого боку, візуалізаційний експеримент проводився за максимальних рівнів потужності роботи експериментального зразка. Таким чином, при проведенні експериментів температура димового струменя в точці контакту з трубою складала, близько, 48 °С, а температура поверхні труби – 135 °С. Температура повітря оточуючого середовища – 18 °С. Крім цього, для виявлення самостійного впливу нагрітого тіла на гідродинаміку оточуючого середовища загалом та струменя диму зокрема, візуалізаційний експеримент проведено на холодному (без підведення теплової енергії) та гарячому зразку окремо.

### 3. Результати візуалізаційної роботи

На рис. 2, *а* показані результати візуалізаційної роботи на холодному зразку. На рис. 2, *б* – на гарячому. Фото на рис. 2 представлені в порядку зміщення струменя диму зліва на право. З порівняння отриманих знімків можна підкреслити кілька характерних особливостей: за омивання холодної труби струменем диму, останній рухається по траєкторії з найменшим гідравлічним опором. При цьому після проходження міделевого перетину циліндра, струмінь відривається від поверхні циліндра і рухається вертикально вгору.

При підведенні струменя диму з радіальною координатою, відрахованою від осі циліндра, що більша за радіус труби, розвиток струменя при проходженні горизонтального рівня труби зберігає прямолінійний рух. Навіть за торкання труби (при підведенні диму в точці, радіальна координата якої приблизно рівна радіусу труби), лінія току струменя залишається незмінною. При підведенні струменя по вісі труби, в точці лобового зіткнення струмінь розбивається, утворює уявний підковоподібний шар, омиває циліндр з протилежних сторін та після проходження міделевого перетину труби продовжує рухатися, приблизно, вертикально вгору (або з певним нахилом до вертикальної площини симетрії труби).

Аналізуючи результати візуалізаційних досліджень на гарячому зразку, в першу чергу необхідно підкреслити ламінарність руху теплоносія при омиванні циліндра в описаних умовах, що повністю відповідає існуючим поглядам на гідродинаміку пограничного шару на циліндрі в умовах проведення експерименту. При цьому, ламінарність струменя гарячого теплоносія зберігається на відстані, що перевищує 5–6 діаметрів труби. Помітно, що динамічний пограничний шар існує вже на відстані близько 8 мм від поверхні труби (тобто викривлення прямолінійної траєкторії руху струменя диму помітне вже на вказані відстані).

При цьому, необхідно мати на увазі, що отримане значення буде заниженою величиною, адже, при

зменшенні впливу теплового пограничного шару (із збільшенням відстані від поверхні труби) на нерухоме оточуюче середовище, фізична можливість нагрітого рухомого теплоносія суттєво змінити напрям руху димового струменя зменшується.

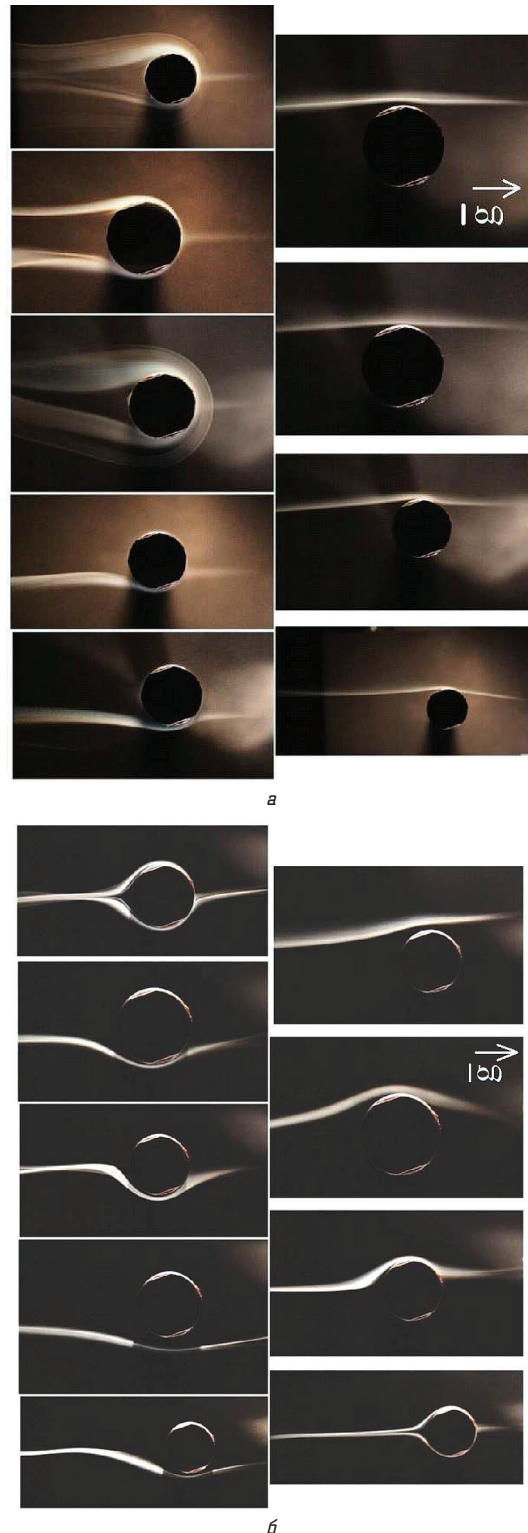


Рис. 2. Результати димової візуалізації: *а* — на холодному зразку, *б* — на гарячому зразку

Відповідно до результатів описаних в [6], та підходу до визначення пограничного шару, що наведено

в [7], значення товщини теплового пограничного шару близько 9 мм. При цьому, відповідно до [8], товщина динамічного шару для високов'язких рідин буде вищою за товщину теплового пограничного шару, а для низьков'язких (наприклад, повітря) можуть приблизно співпадати. В інших джерелах [9] сказано про залежність між товщинами теплового та динамічного пограничних шарів, що визначаються згідно рівняння:

$$\delta_T = \frac{\delta_V}{\sqrt{Pr}}, \quad (1)$$

що загалом підтверджує описаний в [8] підхід. В формулі (1)  $\delta_T$  [м] — товщина теплового пограничного шару;  $\delta_V$  [м] — товщина динамічного пограничного шару;  $Pr$  — безрозмірне число Прандтля.

При наблизненні точки підведення димового струменя до стінки труби помітно, що струмінь диму захоплюється відповідним динамічним шаром та надалі продовжує рухатися разом з ним. В зв'язку з цим, в картині омивання можна виділити лінії току, траєкторії яких мають суттєво відмінну кривизну, та отримані при зближенні точки підводу диму до вертикальної вісі симетрії труби. При підведенні струменю в вертикальній площині симетрії, в точці лобового зіткнення струмінь розділяється на дві, приблизно рівні частини, та осесиметрично омиває циліндр з двох сторін. Такий результат в вертикальній площині симетрії підтверджує теорію осесиметричності розвитку динамічного та, відповідно, теплового пограничних шарів. На відповідному знімку можна виділити застоїнну зону в верхній частині труби, приблизно вздовж верхньої утворюючої циліндра. В зв'язку із нерухомістю цієї області, частинки диму не можуть потрапити в неї. Крім цього, за детального розгляду, можна помітити нарощування нерухомої області в кормовій частині циліндра (між лінією зовнішньої поверхні циліндра та підсвіченим струменем диму), що може приблизно відповідати нарощуванню товщини нерухомого шару в цьому місці. Порівняно висока швидкість нарощування нерухомої області в цій частині поверхні циліндра, пов'язана із зміною загального напрямку руху частинок теплоносія та диму: в лобовій частині омивання циліндра, по мірі нагріву частинок теплоносія вектор руху нагрітих частинок напрямлений вгору. Маючи непронику перешкоду у вигляді горизонтального циліндра на шляху руху в напрямі вектору дії Архімедової сили, гаряча частинка починає відхилитися в напрямі, що визначається принципом суперпозиції між напрямком дотичною до поверхні циліндра (тієї з них, проекція на вектор дії сили тяжіння якої має протилежний напрямок) та напрямком дії виштовхувальної сили. Такий характер визначення напрямку руху зберігається протягом усього шляху омивання. При цьому, після проходження міделевого перетину, гаряча частинка прагне рухатися від поверхні циліндра чому протидіють сили в'язкості та, певною мірою, сили інерції. З іншого боку, відрив гарячої частинки теплоносія в верхній частині циліндра, призводить до виникнення локальної зони пониженого тиску, куди підсмоктуються нагріті частинки теплоносія, що утворилися нижче (за вертикальною координатою). Ланцюговість такого взаємного впливу призводить до утворення вузького теплового сліду над верхньою утворюючою циліндра.

Отримана візуалізація нарощування нерухомого шару в кормовій частині циліндра, однозначно має відобразитися в підвищенні температури стінки. При цьому, зміна температури стінки має певною мірою корелюватися з геометричними розмірами тіла та загальною інтенсивністю процесу. Так в [10], для циліндрів діаметрами 4,8 та 9,45 мм показано, що різниця в температурі стінки складала менш 0,3 °C та менш 1,7 °C, відповідно. Графічне співставлення різниці температури верхньої та нижньої утворюючих циліндра з загальним рівнем перепаду температури представлено на рис. 3. З іншого боку, в [11] та [12], наведено розподіл температури при фізичному експерименті, що відображено на рис. 4, 5 відповідно.

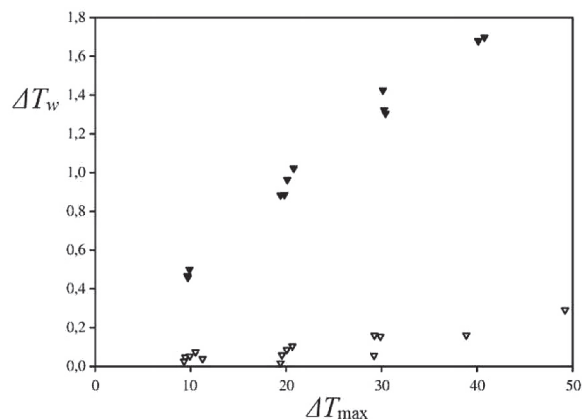


Рис. 3. Нерівномірність температури поверхні циліндра при залежності різниці температури верхньої та нижньої горизонтального циліндра ( $\Delta T_w$  [K]) від різниці середньої температури стінки труби та оточуючого теплоносія ( $\Delta T_{max}$  [K]) [10] для: ▼ — циліндра з зовнішнім діаметром 9,45 мм; ▽ — циліндра з зовнішнім діаметром 4,8 мм

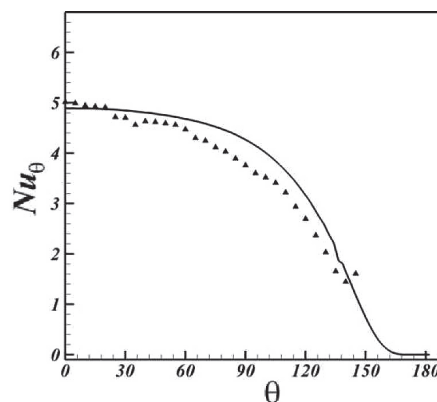
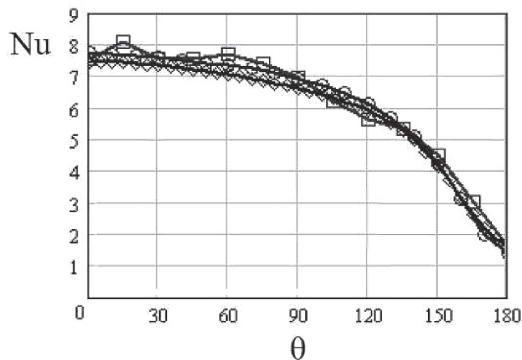


Рис. 4. Нерівномірність температури поверхні циліндра при зміні інтенсивності тепловіддачі ( $Nu_\theta$ ) на поверхні одиночного циліндра, в залежності від кутової координати ( $\theta$ ) [11]: ▲ — експериментальні дані; ————— — результати математичного моделювання

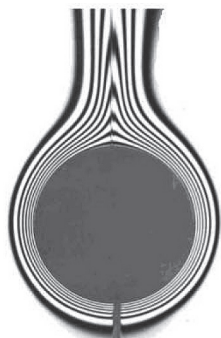
При проведенні досліджень, що описані в [6], отримана різниця в температурах стінки між верхньою та нижньою утворюючими циліндра складала, максимально 7–8 °C, що складає близько 5 % від загального рівня різниці температури поверхні труби та температури теплоносія далеко від поверхні теплообміну. При цьому, з загальною теорією теплопровідності відомо [13, 14], що в металевому циліндрі, при рівномірному виділенні теплоти (а саме такі умови відтворюються в усіх експериментальних роботах [6, 10–12]) розподіл температури



по товщині циліндра матиме осесиметричний характер. В зв'язку з цим, саме наявність теплообміну на зовнішній стороні циліндра призводить до нерівномірності температури поверхні циліндра (в зв'язку з нерівномірністю коефіцієнтів тепловіддачі). Тепловіддача на поверхні циліндра, в нашому випадку, змінюється в зв'язку із нарощуванням товщини пограничного шару загалом та нерухомого шару теплоносія зокрема. Таке нарощування й можна помітити в кормовій частині циліндра при детальному розгляді фотографій з осесиметричним підводом струменя диму.



**Рис. 5.** Нерівномірність температури поверхні циліндра при зміні інтенсивності тепловіддачі ( $Nu$ ) від одиночного горизонтального циліндра в залежності від кутів координати ( $\theta$ ) при  $Pr = 0,7$  та  $Gr = 4,4 \cdot 10^4$  [12]:  $\square$  — експериментальні дані;  $\circ$  та  $\diamond$  — розрахунок на сітках розміром  $60 \times 37$  та  $80 \times 73$  відповідно



**Рис. 6.** Інтерферограма отримана при охолодженні горизонтального циліндра (за  $Gr = 30\,000$ ) [15]

На рис. 6 наведено інтерферограму, що представлено в [15], що зображає лінії розподілу шарів з різними температурами. Не зважаючи на фізичну відмінність між лініями току (що відображені на рис. 2, б) та границями зміни густини повітря (рис. 6) можна помітити приблизну відповідність отриманих кривих, що з одного боку підтверджує зв'язок гідродинамічної та теплової задач в умовах вільної конвекції, а з іншого дає право висунути тезу, про можливість оцінки кривизни (профілю) ізотер в товщі теплоносія в пристінній області

при введенні в динамічне поле струменя диму.

Крім цього, з представлених результатів візуалізації, можна стверджувати, що область мінімального помітного руху теплоносія, що перевищує границі помітної зміни температури.

#### 4. Висновки

Запропонований спосіб візуалізації динамічного поля в умовах вільної конвекції є простим, наочним та достатньо швидким, в зв'язку з чим його можна рекомендувати до застосування при дослідженні задач вільноконвективного теплообміну при використанні повітря в якості теплоносія. В результаті проведеної роботи наочно підтверджено ряд припущень, що покладаються в основу розрахунків та методик аналізу результатів експерименту. Серед таких, зокрема можна

виділити, ламінарність режиму руху теплоносія, ріст товщини пограничного шару в кормовій частині циліндра, симетричність омивання циліндрів з різних сторін від вертикальної площини симетрії. Співставлення результатів з даними, що представлені в літературі, показує високу відповідність.

#### Література

1. Чаплиц, А. Д. Визуализация газовых потоков во внутренних каналах (методы и результаты экспериментальных исследований) [Текст] / А. Д. Чаплиц, А. И. Астапов. — Днепропетровск: НАН Украины и НКА Украины Институт технической механики, 2007. — 210 с.
2. Руденко, А. И. Метод визуализации течения газового потока на поверхности тел различной формы [Текст] / А. И. Руденко, А. М. Терех, А. В. Семеняко, А. П. Нищик, А. В. Баранюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2011. — № 1/9(49). — С. 51–55.
3. Бабенко, В. В. Визуализация обтекания полусферических углублений [Текст] / В. В. Бабенко, В. П. Мусиенко, В. Н. Турик, Д. Е. Милуков // Прикладна гідромеханіка. — 2010. — Т. 2, № 4. — С. 3–25.
4. Sparrow, E. M. Effect of missing cylinder on heat transfer and fluid flow in an array of cylinders in cross-flow [Text] / E. M. Sparrow, M. Molki. International journal of heat and mass transfer. — 1982. — V. 25, Issue 4. — pp. 449–456.
5. Попов, И. А. Экспериментальное исследование теплоотдачи и течения на вертикальных поверхностях с дискретной шероховатостью при свободной конвекции газа [Текст] / И. А. Попов, Р. А. Усенков // Труды третьей российской национальной конференции по теплообмену, 21–25 октября 2002 г., Москва / Российская Академия наук отделение энергетики, механики, машиностроения и проблем управления, Министерство образования и науки РФ, Федеральное агентство по науке и инновациям, Национальный комитет РАН по тепло- и массообмену, Московский энергетический институт. — Т. 3. — М.: МЭИ, 2002. — 231 с.
6. Туз, В. О. Экспериментальное дослідження теплообміну в умовах вільної конвекції на поверхні горизонтального циліндра [Текст] / В. О. Туз, Р. В. Неїло // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2013. — Т. 6, № 5(66). — С. 17–23.
7. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст]: пер. с нем. / Г. Шлихтинг. — М.: Наука, 1974. — 712 с.
8. Гебхарт, Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен [Текст]: пер. с англ. / Б. Гебхарт, Й. Джалурія, Р. Махаджан, Б. Саммакия. — В 2-х книгах, кн. 1. — М.: Мир, 1991. — 678 с.
9. Sesonske, A. Velocity and temperature distributions about a horizontal cylinder in free convection heat transfer [Text] / A. Sesonske // AIChE Journal. — 1961. — V. 7, Issue 2.
10. Atayilmaz, S. Ö. Experimental and numerical study of the natural convection from a heated horizontal cylinder [Текст] / S. Ö. Atayilmaz, İ. Teke // International Communications in Heat and Mass Transfer. — 2009. — № 36. — pp. 731–738.
11. 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.
12. Афанасьева, В. В. Моделирование конвекции на основе метода дискретных вихрей [Текст] / В. В. Афанасьева, А. В. Афанасьев // Труды пятой российской национальной конференции по теплообмену, 25–29 октября 2010 г., Москва / Российская Академия наук отделение энергетики, механики, машиностроения и проблем управления, Министерство образования и науки РФ, Федеральное агентство по науке и инновациям, Национальный комитет РАН по тепло- и массообмену, Московский энергетический институт (технический институт). — Т. 3. — М., 2010. — 338 с.
13. Исаченко, В. П. Теплопередача [Текст] / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1975. — 487 с.

14. Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. — 2 изд. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.
15. Van Dyke, M. An album of fluid motion [Текст] / M. Van Dyke. — The Parabolic Press. Stanford California, 1982. — 184 p.

#### **ДЫМОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРИ ТЕПЛОБМЕНЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА**

В работе представлены результаты работы по визуализации линий тока теплоносителя при теплообмене свободной конвекцией на поверхности горизонтального цилиндра в условиях большого объема. Полученные результаты дают возможность более глубоко понять процессы и причины разного рода изменений, которые имеют место в описанном явлении.

**Ключевые слова:** теплообмен, свободная конвекция, горизонтальная труба, гидродинамика, визуализация.

*Неїло Роман Володимирович, аспірант, кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: roneilo@gmail.com.*

*Неїло Роман Владимирович, аспирант, кафедра атомных электрических станций и инженерной теплофизики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.*

*Neilo Roman, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: roneilo@gmail.com*

УДК 621.833

**Сапронова С. Ю.,  
Мушоватый А. А.,  
Ткаченко В. П.**

## **ХАРАКТЕР КОНТАКТА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ С КОНХОИДАЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ ЗАЦЕПЛЕНИЯ**

*Получены условия, определяющие характер контакта рабочих поверхностей зубьев с конхоидальной линией зацепления в зависимости от геометрических параметров исходного контура. Определены параметры исходных контуров, обеспечивающих выукло-вогнутый контакт зубьев и контакт двух выпуклых зубьев зацепляющейся пары. Даны рекомендации по определению параметров исходного контура в зависимости от характера контакта рабочих поверхностей цилиндрических прямозубых передач.*

**Ключевые слова:** зубчатая передача, поверхность, профиль, зуб, контур, контакт, конхоидальная линия зацепления.

### **1. Введение**

В приводах современных машин могут найти применение неэвольвентные зубчатые передачи, обладающие более высокой нагрузочной способностью в сравнении с эвольвентными зубчатыми передачами. Среди этих передач перспективными являются зубчатые передачи с конхоидальной линией зацепления (конхоидальные зубчатые передачи) [1].

Нагрузочная способность зубчатых передач зависит от того, какой характер контакта рабочих поверхностей: контакт двух выпуклых или контакт выпуклой и вогнутой поверхностей. Поэтому актуальным является решение задачи по определению геометрических параметров зубьев, обеспечивающих заданный наиболее рациональный характер контакта их рабочих поверхностей. Это в полной мере относится к зубчатым передачам с конхоидальной линией зацепления, для которых эта задача не решалась.

### **2. Анализ последних исследований и публикаций**

Геометрия зубьев передач с конхоидальной линией зацепления глубоко исследована в работах [2–5], в которых предложены разновидности исходных контуров

зубьев и экспериментально установлено, что эти зубчатые передачи имеют более высокие критерии работоспособности в сравнении с эвольвентными передачами. Однако определение геометрических параметров исходных контуров проведено без анализа характера контакта рабочих поверхностей зубьев. С учетом данного условия проведены исследования неэвольвентных зубчатых передач, результаты которых изложены в работах [5–9]. Данная статья посвящена разработке рекомендаций по определению параметров исходных контуров зубьев передач с конхоидальной линией зацепления в зависимости от характера контакта рабочих поверхностей.

Целью проведенных исследований была разработка рекомендаций по определению параметров исходного контура зубьев передач с конхоидальной линией зацепления, обеспечивающих контакт выпукло-вогнутого или двух выпуклых рабочих поверхностей зацепления.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи:

1. Получить условия, определяющие параметры исходного контура зубьев передач с конхоидальной линией зацепления при обеспечении выпукло-вогнутого и выпуклого контактов рабочих поверхностей.
2. Разработать рекомендации по определению геометрических параметров исходных контуров.