

А. ХАЛАТОВ

**ПОВЕРХНЕВІ ГЕНЕРАТОРИ ВИХОРИВ:  
ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ДОСЯГНЕННЯ І НОВІ ЗАСТОСУВАННЯ**

*Вихрові і закручені потоки широко використовуються для інтенсифікації тепло- і масообміну та вдосконалення процесів горіння в енергетиці, авіації, енерго- і машинобудуванні, хімічній та інших галузях промисловості. Останніми роками особливе зацікавлення дослідників викликав своєрідний клас вихрових потоків — поверхневі заглибини різної форми. Системи з поверхневими генераторами вихорів мають низку специфічних властивостей, серед яких найунікальнішою є порушення аналогії Рейнольдса на користь теплообміну — швидше зростання теплообміну порівняно зі збільшенням гідравлічних втрат.*

*У статті аналізуються основні фундаментальні досягнення у сфері гідродинаміки поверхневих вихрових генераторів і нові практичні застосування для авіації, енергомашинобудування та інших галузей промисловості.*

Попри те, що м'яч для гри у гольф, вкритий дрібними сферичними заглибинами (лунками), вже багато років «гуляє» по ігрових полях, фундаментально дослідили його аеродинаміку лише зовсім недавно [1]. Результатом такого вивчення стало виявлення парадоксальної поведінки кривої залежності коефіцієнта опору від числа Рейнольдса ( $Re$ ). Встановлено, що в області чисел Рейнольдса ( $Re < 100\ 000$ ) коефіцієнт опору м'яча із заглибинами у кілька разів нижчий, ніж для гладкого або шорсткуватого м'яча, а вищим за критичне число Рейнольдса коефіцієнт опору є майже постійним. Так само нетривіально поводить себе і піднімальна сила м'яча із заглибинами, внаслідок

чого в області помірних чисел Рейнольдса дальність його польоту перевищує дальність польоту гладкого м'яча у 3–4 рази.

Такі несподівані гідродинамічні властивості поверхневих заглибин спонукали до широкомасштабних фундаментальних досліджень гідродинаміки і теплообміну поблизу поверхні, вкритої заглибинами різної форми. Від 1983 року декілька дослідницьких програм (зокрема оборонного призначення) виконані в Росії, а з 1996-го — широкі наукові дослідження розпочато у США. Основна мета цих програм — вивчення можливості використання унікальних гідродинамічних властивостей поверхневих генераторів вихорів у прикладних розробках.

© ХАЛАТОВ Артем Артемович. Член-кореспондент НАН України. Завідувач відділу високотемпературної термогазодинаміки Інституту технічної теплофізики НАН України (Київ). 2005.

Опубліковані результати [3] засвідчують, що в області помірних і великих чисел Рейнольдса всередині сферичної заглибини на пласкій поверхні формується вихор, пульсуючий уперек заглибини (рис. 1), який із високою частотою викидається у зовнішній потік. Частота цих викидів залежить від швидкості зовнішнього потоку і його турбулентності. Порівняння лабораторних досліджень із даними, отриманими співробітниками Інституту атомної енергії ім. І.В. Курчатова (Росія), котрі вивчали природні вихори в пустелях Середньої Азії, спонукало до висновку про те, що фізична структура мікрОВихору, який генерується у заглибині, близька до природного макрОВихору на зразок «торнадо» [2]. Тому в американській науковій літературі такий «лабораторний» вихор отримав назву «tornado-like vortex». Подальші аналітичні дослідження показали [2], що для існування «торнадо-вихору» дуже важлива наявність шорсткої підстилаючої поверхні, яка забезпечує «ненульову» граничну умову (піщана чи морська поверхня).

На поверхні із системою поверхневих заглибин виникає взаємоузгоджена «гра вихорів» — колективний ефект самоорганізації, зумовлений взаємодією окремих нестационарних вихрових структур (див. рис. 1). У результаті поблизу поверхні формується нестационарна «вихрова сітка», що значно знижує гідравлічні втрати і збільшує теплообмін [2, 5, 6].

Інша унікальна властивість системи поверхневих заглибин, уперше відкрита російськими дослідниками [2, 5], — це швидше зростання теплообміну порівняно зі збільшенням гідравлічного опору, що є недосяжним для всіх інших методів інтенсифікації теплообміну. Впродовж 1996 — 2000 років цей важливий результат був підтверджений ретельними експериментальними дослідженнями, виконаними в університетах і фірмах США.

Отже, техніка поверхневих генераторів вихорів продемонструвала порушення ана-

логії Рейнольдса на користь теплообміну, що вказує на нетривіальний характер обтікання поверхневих заглибин і неадекватність їх гідродинамічних властивостей звичайним шорсткуватим поверхням.

Нами у 2002 р. висунуто гіпотезу, що теплогідравлічний ефект поверхневих вихорів має бути значнішим за низької швидкості потоку, коли в його структурі відсутні «зовнішні» вихори, спричинені турбулентністю потоку. Протягом 2003 — 2004 років у лабораторіях Військово-повітряної академії США й Університету штату Юта було виконано фундаментальні дослідження нестационарних властивостей систем із поверхневими генераторами вихорів різної форми за низької швидкості обтікання [6–8]. Зокрема, знайдено, що у разі малих чисел Рейнольдса за заглибинами формується не осцилюючий вихор, а принципово нова вихрова структура — нестационарні флуктуації потоку об'ємного типу, які генеруються відривною зоною всередині заглибини. Максимальна частота таких флуктуацій настільки велика, що перевищує нестационарні флуктуації потоку за поперечним обтічним циліндром більш як у 10 (!) разів. Окрім того, було показано, що у пласкому каналі існує оптимальне число Рейнольдса, коли інтенсифікація теплообміну максимально перевищує супутнє зростання гідравлічного опору [9].

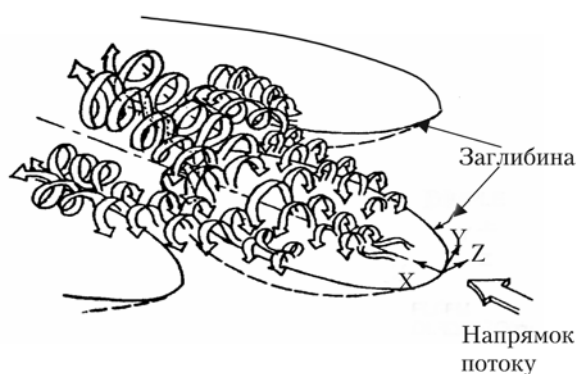


Рис. 1. Усереднена картина вихрових структур біля системи заглибин [4]

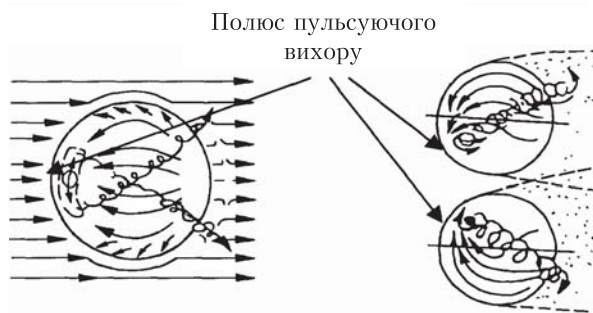


Рис. 2. Нестационарні флуктуації вихору у сферичній заглибині за великих чисел Рейнольдса [3]

Таким чином, підтверджено, що відсутність вихорів у зовнішньому потоці істотно підвищує потенціал техніки поверхневих вихорів.

Велика частина фундаментальних результатів у галузі гідродинаміки і теплообміну в системах із поверхневими вихровими генераторами поки що є закритою для загального користування. Це пояснюється важливими практичними застосуваннями технології поверхневих генераторів вихорів в авіації, машино- і суднобудуванні та ракетній техніці. Як свідчать опубліковані дані [2, 5, 6], відомі застосування поверхневих генераторів вихорів у ядерній енергетиці для охолодження «мішеней», внутрішнього охолодження лопатей турбомашин, у низькотоксичних камерах згорання. Поверхневі вихрові генератори використовуються також для зниження опору шолома гонщика-велосипедиста і лиж для швидкісного спуску. Нещодавно фірма «Volvo» спроектувала експериментальний автомобіль, дно якого вкрито дуже дрібними сферичними заглибинами, що знижують аеродинамічний опір.

У 2001 р. за нашою пропозицією в Інституті технічної теплофізики НАН України ініційовано дослідження з гідродинаміки і теплообміну в системах із вихровими генераторами різної геометричної форми. Частина цих досліджень виконувалась у науковій співпраці з ученими Великої Британії та США. Програма досліджень сконцентрована на області ла-

мінарних чисел Рейнольдса перед заглибинами, об'єктами вивчення слугували заглибини сферичної і циліндрової форм. Головна увага приділялася нестационарній структурі потоку, виникненню відриву потоку в заглибині та об'ємних його пульсацій за заглибинами. Основні гідродинамічні дослідження виконували у водяній і повітряній трубах Військово-повітряної академії США (м. Колорадо Спрингс). Для цього використовували методи візуалізації потоку, комп'ютерний аналіз відеофільмів і техніку рідких кристалів (теплообмін). Деякі результати цих досліджень опубліковані в українських і американських виданнях [6–9].

Глибоке проникнення у нестационарну структуру вихрових потоків дало змогу розробити і запропонувати низку оригінальних конструкцій для авіації, енергомашинобудування та інших галузей промисловості. Розглянемо деякі з них.

Ґрунтуючись на фізичній картині течії, зображеній на рис. 2, було запропоновано принципово нову концепцію осцилюючого плівкового охолодження лопатей турбомашин і високотемпературних об'єктів [10]. На відміну від традиційної технології, охолоджуюче повітря подається через похилий отвір усередині сферичної заглибини. Осцилюючий усередині заглибини вихор високої частоти, діючи як клапан, періодично перекриває цей отвір і формує осцилюючий в осьовому і кутовому напрямках струмінь охолоджувача, що сприяє ефективнішому охолодженню поверхні за заглибинами. Взаємне перекриття окремих «вихрових доріжок» у системі поперечних заглибин дає підстави сподіватися на зниження кількості рядів плівкового охолодження і зменшення поверхневих термічних напруг.

Нестационарна структура вихорів за заглибиною наштовхнула на нову ідею керування відривом потоку у висотних авіаційних двигунах [11]. Оскільки «вихрова доріжка» за заглибиною має значну енергію, то одно- або

дворядна система поперечних заглибин на поверхні використовується для «накачування» прикордонного шару біля поверхні кінетичною енергією і підвищення завдяки цьому його стійкості (рис. 3). Саме ця ідея використана для керування відривом потоку при обтіканні крила літака за великих кутів атаки. Експериментальні і числові дослідження, здійснені спільно з фахівцями Військово-повітряної академії США [12], свідчать про перспективність такої технології.

Не менш оригінальна і вихрова технологія керування повторними течіями в зазорі між нерухомим корпусом турбіни і лопатями, що обертаються [13]. Ця проблема вже давно стоїть перед розробниками газових турбін із високими параметрами термодинамічного циклу. Система заглибин на корпусі турбіни і верхньому торці лопаті формує «гру вихорів», взаємодія яких зумовлює утворення своєрідного газодинамічного «замка». Вивчення природи смерчового вихору сприяло народженню ідеї «стиснутого» мікротовихору з радіальною швидкістю, спрямованою усередину вихрової структури. Такий вихор вельми стійкий, має здатність до концентрації енергії у ньому і забезпечує високий рівень теплообміну за помірних втрат тиску. Нами запропонована технологія проектування такого вихору, яка використовується в інноваційних системах внутрішнього охолодження лопатей турбомашин [14].

За останні десятиліття Інститут технічної теплофізики НАН України впевнено посів провідне місце у світі з розробки фундаментальних проблем теплообміну та гідродинаміки вихрових і закручених потоків. Отримані в інституті прикладні результати зацікавили низку провідних зарубіжних фірм енергомашинобудівного профілю — таких, як «Роллс-Ройс» (Велика Британія), «Дженерал Електрик», «Пратт-Уїтні», Лос-Аламоська національна лабораторія (США) та деяких інших, куди запрошували для читання лекцій і проведення наукових семінарів.

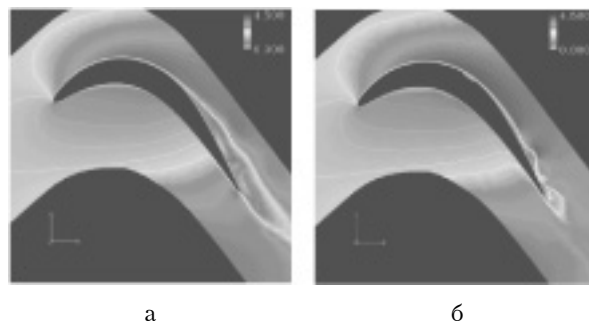


Рис. 3. Пригнічення відриву потоку ( $Re = 25000$ ) в турбіні низького тиску висотного авіадвигуна [6]: а — лопать турбіни низького тиску: відрив потоку; б — пригнічення відриву потоку: заглибини на поверхні

Фундаментальні та прикладні дослідження ІТТФ НАН України в галузі вихрових і закручених потоків були підтримані двома грантами Королівського (наукового) товариства (Велика Британія), трьома — Наукового комітету НАТО, чотирма — CRDF, грантами National Science Foundation, National Research Council (США) та деякими іншими. 2001 року під нашим керівництвом в Києві проведено українсько-американський науковий семінар CRDF «Нові технології аеротермодинаміки і горіння», а в 2002 р. за фундаментальні дослідження в галузі інноваційних (вихрових) систем охолодження лопатей газових турбін нас спільно з ученими Великої Британії і Росії удостоєно першої міжнародної премії Наукового комітету НАТО.

Сьогодні фундаментальні дослідження ІТТФ НАН України спрямовані на експериментальне і теоретичне вивчення нестационарної гідродинаміки і теплообміну біля поверхонь із заглибинами різної геометричної форми. Прикладні дослідження зосереджено на створенні вихрового теплообмінника з ультранизькими втратами тиску для рекуперації теплоти за мікротурбінами і газодизелями, які використовуються у системах децентралізованого енергопостачання. Ці дослідження, підтримані грантом фонду CRDF за програмою «Next Steps to Market» [9, 15], завершаться наприкінці

2005 року. Відтак пілотний зразок рекуператора буде передано до США для проведення незалежних випробувань за американськими стандартами.

1. *Bearman P., Harvey J.* Golf ball aerodynamics // *Aeronautical Quarterly*. — 1976. — 27. — P. 112–122.
2. *Кикнадзе И.А., Гачечиладзе И.А., Алексеев В.А.* Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация теплообмена, сопровождающая это явление. — М., 2005. — 82 с.
3. *Кесарев В.С., Козлов А.П.* Структура течения и теплообмен при обтекании полусферического углубления турбулизированным потоком воздуха // *Вести МГТУ. Сер. машиностроение*. — 1993. — № 1. — С. 106–115.
4. *Mahmood G.I., Hill M.L., Nelson D.L., Ligriani P.L., Moon H.-K., Glezer B.* Local heat transfer and flow structure on and above a dimpled surface in a channel // *Journal Turbomachinery*. — 2001. — 123. — P. 115–123.
5. *Нагога Г.П.* Эффективные методы охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин. — М., 1996. — 100 с.
6. *Халатов А. А.* Теплообмен и гидродинамика околповерхностных углублений (лунок). — К., 2005. — 140 с.
7. *Khalatov A., Byerley A., Min S-K., Ochoa D.* Flow characteristics within and downstream spherical and cylindrical dimple on a flat plate at low Reynolds numbers // 2004. ASME (American Society Mechanical Engineers). — Paper GT2004-53656.
8. *Khalatov A., Byerley A., Min S-G, Vincent R.* Application advanced techniques to study fluid flow and heat transfer within and downstream a single dimple // 2004. Доклады V Минского междунар. форума по тепло- и массообмену (MIF-5).
9. *Borisov I., Khalatov A., Kobzar S., Glezer B.* Comparison thermal-hydraulic characteristics for two types dimpled surfaces // 2004. ASME (American Society Mechanical Engineers). — Paper № GT2004-54204.
10. Пат. України № 47749. 2004./Спосіб плівкового охолодження та пристрій для його здійснення/ *А.А. Халатов, І.С. Варганов*. 15.07.2002. Бюл. № 7.
11. Пат. України № 44532А. 2002./Лопатка двигуна, турбіни, компресора, вентилятора/ *А.А. Халатов, І.С. Варганов, Г.В. Коваленко, І.І. Борисов*. 15.02.2002. Бюл. № 2.

12. *Khalatov A., Robarge T., Stark A., Seong-Ki Min, Byerley A.* Design considerations for using intended surface treatments to control boundary layer separation // 2004. 42Nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno. USA.
13. Пат. України № 51043. 2002./Кінцева частина лопатки і корпус турбіни/ *А.А. Халатов, І.С. Варганов, С.А. Халатов*. 15.11.2002. Бюл. № 11.
14. Пат. України № 36360. 1999./Соплова лопатка з циклонним охолоджувачем/ *А.А. Халатов, І.С. Варганов, І.І. Борисов*. 16.04.2001. Бюл. № 3.
15. Пат. України № 58222. 2002./Спіральний теплообмінник і спосіб його виготовлення/ *А.А. Халатов, І.С. Варганов, І.І. Борисов, С.Г. Кобзар*. 15.07.2003. Бюл. № 7.

*А. Халатов*

#### ПОВЕРХНЕВІ ГЕНЕРАТОРИ ВИХОРИВ: ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ДОСЯГНЕННЯ І НОВІ ЗАСТОСУВАННЯ

##### Резюме

Аналізуються особливості поверхонь із заглибинами різної форми, які мають специфічні гідродинамічні властивості. Серед них найунікальніші — осцилюючий у заглибині вихор і швидше зростання теплообміну порівняно зі збільшенням гідравлічних втрат. Ці властивості можуть використовуватися для створення нових технологій вихрової термоаеродинаміки. Розглядаються основні досягнення фундаментальних досліджень гідродинаміки поверхневих вихрових генераторів та нові практичні застосування їх результатів в авіації, енергомашинобудуванні, інших галузях промисловості.

*А. Khalatov*

#### SURFACE VORTEX GENERATORS: FUNDAMENTAL STUDIES AND NOVEL APPLICATIONS

##### Summary

Surfaces structured with indentations various shape demonstrate specific hydrodynamic features amongst those are side-to-side oscillating vortex and prevail heat transfer augmentation over pressure drop growth. These physical properties can be employed in novel vortex technologies aerothermodynamics. Primary fundamental achievements along with a few novel applications for aviation, energy machine-building and other industries are given in this paper.