

**Національна академія наук України**

**ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ**

**РЕФЕРАТ**

**роботи на здобуття щорічної премії  
Президента України для молодих вчених**

**СИСТЕМИ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ЛОПАТОК  
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ГАЗОВИХ ТУРБІН**

**ПАНЧЕНКО Надія Анатоліївна** – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу високотемпературної термогазодинамики Інституту технічної теплофізики НАН України, старший викладач кафедри фізики енергетичних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**БЕЗЛЮДНА Марія Володимирівна** – кандидат технічних наук.

**ПЕТЕЛЬЧИЦ Вікторія Юріївна** – кандидат технічних наук, інженер-конструктор II кат. групи розрахунків систем охолодження та температурного стану деталей турбін конструкторського відділення Державного підприємства Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект».

**КИЇВ – 2017**

**Актуальність теми.** Газові турбіни широко використовуються в енергетиці, цивільній та військовій авіації, суднобудуванні, на магістральних газопроводах газотранспортних систем. Підвищення температури газу перед турбіною є основним напрямком підвищення економічності ГТУ і ГТД різного застосування. Сьогодні температура газу перед турбіною досягає 1500...1600 °С в потужних енергетичних ГТУ і 1750...1800 °С – в кращих авіаційних ГТД. В Україні для ГТД наземного застосування (енергетика, механічний привід) надійно освоєна температура 1300...1350 °С.

На сучасному технічному рівні можливість підвищення температури газу перед турбіною обмежується допустимою за умовами міцності температурою матеріалу лопаток. В даний час турбінні лопатки, виконані з кращих жаростійких матеріалів, можуть працювати без охолодження при температурі газу не вище 1000...1100 °С. При більш високих температурах для підтримки їх працездатності застосовується внутрішнє і зовнішнє охолодження цикловим повітрям. Для зовнішнього охолодження, поряд з термобар'єрним покриттям, широко використовується плівкове (завісне) охолодження, коли охолоджувач з внутрішньої порожнини лопатки подається на охолоджувану поверхню через систему дискретних отворів діаметром 0,5...1,0 мм.

Починаючи з 50-х років, в світі виконано великий обсяг теоретичних і експериментальних досліджень, що дозволяє надійно виконувати розрахунки традиційних схем плівкового охолодження, таких як тангенційна і суцільна щілина, пористий і аблюючий пояски, ряди похилих циліндричних отворів. Великий внесок у розвиток систем плівкового охолодження внесли роботи українських вчених (Дибан Є.П., Репухов В.М., Халатов А.А.), фахівців колишнього СРСР (Кутателадзе С.С., Леонтьєв О.І., Волчков Є.П., Губертів А.М., Богомолів Є.М., Арсен'єв Л.В., Щукін А.В.), США (Еккерт Є.Р., Гольдштейн Р.Дж., Банкер Р.С., Богард Д.Дж, Себан Р.А.), а також Німеччини (Дітмар Дж., Шульц А., Балдауф С., Відхард К.). Результати цих досліджень дозволили отримати узагальнюючі рівняння, розробити надійні методики і програми розрахунку, використані при створенні серії ГТД і ГТУ різного призначення.

При температурі газу вище 1400 °С витрата повітря на охолодження лопаток при конвективно-плівковому охолодженні може становити 15 % і більше від витрати повітря через компресор, тому при подальшому підвищенні температури витрата охолоджувача може зростати настільки, що втрати від змішування основного потоку з охолоджувачем можуть перевищити позитивний ефект, досягнутий за рахунок охолодження. Тому до одного з перспективних напрямків сучасного газотурбобудування є пошук альтернативних схем охолодження, які характеризуються більш високими значеннями ефективності плівкового охолодження і меншою витратою охолоджувача.

Аналіз опублікованих робіт показав, що в даний час в США, Японії, Німеччини, Росії основна увага зосереджена на наступних альтернативних напрямках: а) профільовані отвори складної форми - віялові («fan-shaped»), консольні, дифузорні та ін.; б) отвори з подачею охолоджувача в поглиблення різної форми - напівсферичні, траншейні, кратери та ін.; в) анти-вихрові системи - парні отвори («double-jet»), додаткові бічні отвори, отвори, спрямовані під зворотнім кутом та ін.

З розглянутих конфігурацій найбільший практичний інтерес для газотурбобудування України представляють віялові отвори (група *a*), подача охолоджувача в напівсферичні поглиблення (запропонована і запатентована ІТТФ НАНУ) і траншею (група *b*), а також парні отвори зі складними кутами подачі охолоджувача (група *в*). Ці конфігурації розглянуті в даній роботі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота відповідає переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок за напрямом «Енергетика та енергоефективність. Технології енергетичного машинобудування», затверджених Постановою Кабінету Міністрів України №942 від 7 вересня 2011 р. Наукові результати, представлені в роботі, використані в держбюджетних НДР № 1.7.1.853 Дослідження поверхнево-вихрових систем для інтенсифікації теплообміну і підвищення ефективності охолодження поверхонь в перспективних ГТД» (ІТТФ НАНУ, № д/р 0112U002042) та НДР № 2610-ф «Теплові і газодинамічні процеси в складних вихрових і закручених потоках» (НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», № д/р 0113U002467); науково-технічній роботі за Договором №310/2056 «Порівняльні дослідження осцилюючого та інших перспективних схем плівкового охолодження поверхонь» (ІТТФ НАНУ та ДП НВКГ «Зоря» - «Машпроект»); науковій роботі за Договором №01-08-14 «Експериментальне і чисельне дослідження перспективних систем плівкового охолодження високотемпературних енергетичних установок» (спільний проект програми НАН України і РФФД, № д/р 0114U004037); НДР № 1.7.1.АХ.1 «Нові термодинамічні цикли та схеми завісного охолодження високотемпературних енергетичних установок» (договори між Відділенням цільової підготовки НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», НАНУ та Президією НАНУ, № г/р 0115U000968).

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є дослідження фізичних закономірностей, що характеризують ефективність плівкового охолодження інноваційних систем з подачею охолоджувача в поглиблення різної форми та при створенні складної вихрової структури на вході, визначення розрахункових залежностей та розробка методики розрахунку, що враховують вплив параметра вдуву, прискорення, зовнішньої турбулентності і неізотермічності потоку, кривизни вхідної кромки і профілю лопаток газових турбін.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі *основні задачі*:

— Виконати експериментальне дослідження ефективності плівкового охолодження плоскої поверхні і отримати базову залежність при відсутності впливів для отворів в напівсферичних поглибленнях і парних отворів.

— Вивчити вплив зовнішньої турбулентності і від'ємного градієнту тиску при різних законах прискорення потоку і отримати залежності, що характеризують вплив цих факторів на ефективність плівкового охолодження плоскої поверхні за отворами в напівсферичних поглибленнях і парними отворами.

— Вивчити вплив кривизни для моделі з циліндричною вхідною кромкою і плоскими стінками, моделі вхідної кромки реальної лопатки з профільованими поверхнями, визначити вплив факторів які мають місце в реальному міжлопатковому каналі, отримати залежності і рівняння при подачі охолоджувача через трьохрядні системи отворів розташовані на ділянці вхідної кромки.

— Визначити математичні моделі турбулентності, які адекватно описують ефективність плівкового охолодження при різних граничних умовах.

— Вивчити фізичну структуру потоку та визначити фактори, що характеризують фізичний механізм плівкового охолодження.

— На основі отриманих результатів розробити методики розрахунку ефективності плівкового охолодження для вхідної кромки лопатки і її середньої частини при подачі охолоджувача в поглиблення різної форми і при створенні складної вихрової структури на вході з урахуванням факторів, вивчених в даній роботі.

**Методи дослідження.** З огляду на складний характер тривимірної вихрової течії, в роботі використано поєднання експериментального і теоретичного методів дослідження. Дослідження виконані на плоскій поверхні, яка моделює слабовикривлену поверхню середньої частини лопатки, на циліндричній моделі вхідної кромки з плоскими стінками за нею, а також на моделі вхідної кромки реальної лопатки при натурних умовах. В якості базових конфігурацій для порівняння використовувалися традиційна схема циліндричних похилих отворів на плоскій поверхні, традиційна схема з подачею охолоджувача в систему радіальних циліндричних отворів і систему паралельних отворів на ділянці вхідної кромки. Для виконання розрахунків використовувалось програмне забезпечення ANSYS CFX.

При експериментальному дослідженні вивчалася фізична структура потоку, локальна та середня ефективність плівкового охолодження з урахуванням впливу параметра вдуву, прискорення, неізотермічності і зовнішньої турбулентності потоку. Ці результати використовувалися для отримання узагальнюючих рівнянь подібності і коригувальних функцій. При комп'ютерному моделюванні визначалися деякі «тонкі» особливості фізичної структури потоку, фактори, що визначають ефективність плівкового охолодження для досліджених систем охолодження, а також адекватні моделі турбулентності.

#### **Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:**

— Вперше для умов подачі охолоджувача в систему напівсферичних поглиблень і парних отворів на вході отримані базові рівняння подібності, що характеризують ефективність плівкового охолодження на плоскій поверхні, а також коригувальні залежності, що характеризують вплив турбулентності і прискорення зовнішнього потоку.

— Для подачі охолоджувача в систему напівсферичних поглиблень і парних отворів отримані нові наукові дані, що характеризують фізичну структуру потоку, визначені фактори, що сприяють підвищенню ефективності плівкового охолодження в порівнянні з традиційною схемою похилих отворів.

— Для реальної лопатки і моделі вхідної кромки з плоскими стінками при параметрах близьких до експлуатаційних, отримані нові наукові дані, що характеризують фізичну структуру потоку при подачі охолоджувача в напівсферичні поглиблення, траншею, віялові отвори, традиційні радіальні і паралельні отвори; отримані розрахункові рівняння щодо ефективності плівкового охолодження за традиційними радіальними отворами і отворами в траншеях.

— Показано, що кривизна профілю і прискорення потоку (градієнт тиску) впливають на перерозподіл охолоджувача через отвори плівкового охолодження вхідної кромки лопатки, отримані відповідні залежності та надано рекомендації з проектування системи охолодження.

— Показано, що високі значення ефективності плівкового охолодження на вхідній кромці лопатки та її середній частині досягаються при подачі охолоджувача

в траншею. Порівняння показало, що така конфігурація не поступається кращим зарубіжним аналогам, та характеризується більш простою (і більш дешевою) технологією виготовлення.

— Для досліджених конфігурацій при граничних умовах найбільш характерних для реальних лопаток газових турбін (градієнт тиску, прискорення потоку, температурний фактор, плоска, увігнута і опукла поверхня) визначені математичні моделі турбулентності, які адекватно описують ефективність плівкового охолодження і фізичну структуру потоку.

— На основі нових наукових результатів розроблені методики високої точності для розрахунку ефективності плівкового охолодження вхідної кромки та середньої частини лопатки при подачі охолоджувача в напівсферичні поглиблення, парні отвори, траншею, віялові отвори, традиційні радіальні і паралельні отвори, які знайшли застосування в практиці енергетичного газотурбобудування України.

**Практичне значення отриманих результатів.** Отримані в роботі результати можуть використовуватися при розрахунках ефективності плівкового охолодження лопаток газових турбін при використанні інноваційних схем, досліджених в роботі. Адекватні моделі, досліджені в роботі, можуть використовуватися при комп'ютерному моделюванні систем плівкового охолодження лопаток газових турбін з подачею охолоджувача в розглянуті схеми. Розроблені методики розрахунку ефективності плівкового охолодження вхідної кромки лопатки і її середньої частини дозволяють з високою точністю і надійністю виконувати розрахунки інноваційних систем плівкового охолодження.

Отримані експериментальні дані і теоретичні результати були використані Інститутом технічної теплофізики НАНУ (акти використання від 16.01.2015 р.) при розробці методики розрахунку ефективності плівкового охолодження соплових лопаток високотемпературних ГТД на замовлення ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» (акт впровадження від 15.11.2013 р.), при проектуванні системи охолодження і розрахунку температурного стану соплових лопаток турбіни високого тиску газотурбінного двигуна ДА32, при розробці робочої лопатки з конвективно-плівковим охолодженням турбіни високого тиску для двигунів типу ДН80 виробництва ДП НВКГ «Зоря» - «Машпроект» (акт впровадження від 21.06.2016). Вони увійшли в колективну монографію «Перспективні схеми плівкового охолодження» (том 10), опубліковану співробітниками ІТТФ НАНУ в 2016 р., а також були використані в навчальному процесі Фізико-технічного інституту НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» при виконанні курсових, дипломних і магістерських робіт, а також в лекційних курсах для студентів за спеціальністю «Прикладна фізика» (спеціалізація «Фізика енергетичних систем та новітніх джерел енергії», акти використання від 27.01.2015 р.).

**Нагорода.** У 2015 р. серія робіт Безлюдної М.В. та Панченко Н.А. з даної тематики удостоєна Грамоти Президії НАН України на конкурсі наукових робіт студентів і молодих вчених НАН України (Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАНУ).

**Апробація результатів роботи.** Основні результати роботи обговорювалися і отримали схвалення на численних міжнародних науково-технічних конференціях, серед яких – IX, X, XI та XII Міжнародні науково-технічні конференції «Проблеми енергозбереження і шляхи їх вирішення», XVIII, XIX та XX Міжнародні конгреси двигунобудівників, VIII та IX Міжнародні конференції «Проблеми промислової

теплотехніки», VI Російська національна конференція по теплообміну, V міжнародна конференція «Тепломасообмін та гідродинаміка в закручених потоках» (Росія) та ін.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми роботи, охарактеризовані її наукова новизна та практична цінність, сформульовані мета і задачі роботи.

**Перший розділ** присвячений огляду науково-технічної літератури. Виконано аналіз сучасного стану досліджень в області ефективності плівкового охолодження плоскої пластини і лопаток газових турбін, визначено коло завдань, що вимагають подальшого дослідження. Розглянуто основні традиційні і перспективні способи організації плівкового охолодження.

У **другому розділі** представлені результати експериментального і теоретичного дослідження закономірностей плівкового охолодження за двома рядами похилих отворів в напівсферичних поглибленнях в широкому діапазоні зміни параметра вдуву  $m = 0,5 \dots 2,0$  при різних умовах. Геометричні параметри досліджуваної схеми (рис 1) були наступними:  $d = 3,2$  мм,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $t = 16$  мм,  $t_1 = 8$  мм,  $D = 8$  мм,  $h = 4$  мм.

За результатами дослідження ефективності плівкового охолодження в умовах безградієнтного низькотурбулентного потоку проведено узагальнення експериментальних даних (рис. 2). На підставі рекомендацій, наведених у літературі, отримана залежність для середньої по ширині пластини ефективності плівкового охолодження для плоскої поверхні. Рівняння описує отримані дані з максимальною похибкою  $\pm 15$  %.

Виконано порівняльний аналіз досліджуваної системи з традиційною системою подачі охолоджувача через два ряди циліндричних похилих отворів. При всіх параметрах вдуву досліджувана система забезпечує більш високу ефективність плівкового охолодження і при високих параметрах вдуву перевищує стандартну більш ніж на 120 %. За системою з отворами в напівсферичних поглибленнях має місце більш рівномірний розподіл охолоджувача в поперечному напрямку, ніж для традиційної. Порівняння з іншими перспективними системами показало, що дана система за ефективністю не поступається системі з «віяловими» отворами, яка вважається найбільш перспективною за кордоном, але характеризується більш складною технологією виготовлення.

*Прискорення потоку* в діапазоні зміни параметра градієнта тиску  $K$  від  $0,5 \cdot 10^6$  до  $3,5 \cdot 10^6$  знижує середню ефективність плівкового охолодження за двома рядами отворів в напівсферичних поглибленнях. З ростом параметру вдуву це зниження зменшується і при  $m \geq 1,0$  становить 5...7 %. Середнє значення відносної функції, що враховує вплив прискорення, при  $m = 0,5$  можна прийняти рівним 0,85, а при  $m \geq 1,0 - 0,95$ .

*Зовнішня турбулентність* при параметрах вдуву  $m = 0,5$  і 1,0 підвищує ефективність плівкового охолодження не більше ніж на 5 % (в межах похибки експериментів). При  $m = 2,0$  на ділянці  $x/d > 10$  вплив турбулентності практично відсутній. При  $m = 0,5$  і 1,0 значення відносної функції, що враховує вплив турбулентності, можна прийняти рівною 1,05, а при  $m = 1,5$  і 2,0 — 1,0.

На рис. 3 наведені лінії течії поблизу плоскої поверхні для обох випадків при  $m = 1,5$ . При подачі охолоджувача через напівсферичні поглиблення струмів

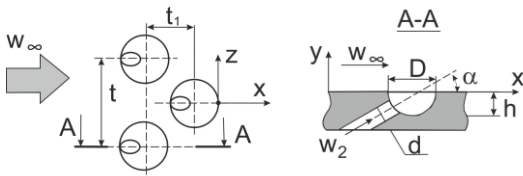


Рис. 1. Схема отворів в напівсферичних поглибленнях

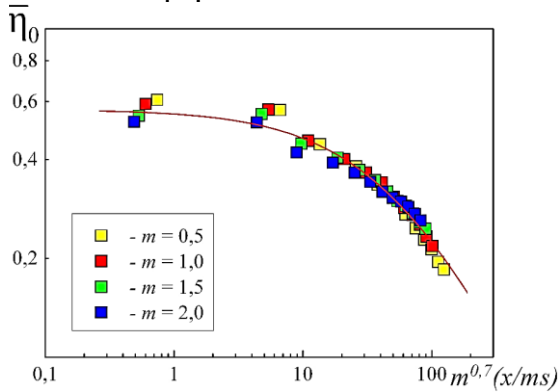


Рис. 2. Результати узагальнення дослідних даних з  $\bar{\eta}_0$  за отворами в напівсферичних поглибленнях

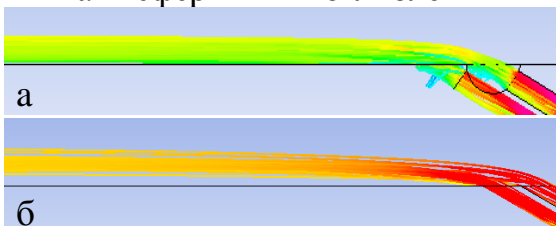


Рис. 3. Лінії течії охолоджувача: а - отвори в напівсферичних поглибленнях; б - традиційні отвори

Виконане в роботі порівняння показало, що при ідентичних умовах середня ефективність плівкового охолодження за парними отворами при малих ( $m = 0,5$ ) і помірних ( $m = 1,0$ ) значеннях параметра вдуву в середньому на 25 % вище, ніж для традиційної системи і відповідає їй при  $m = 1,5$  і більше. Також ефективність плівкового охолодження за парними отворами при  $m \leq 1,0$  порівняно з ефективністю інших перспективних схем плівкового охолодження (отвори в траншеї, напівсферичних поглибленнях і т.д.), але при  $m = 1,5$  і  $m = 2,0$  на ділянці  $x/d < 15,0$  значно поступається їм.

Узагальнення дослідних даних в діапазоні зміни  $m$  від 0,5 до 2,0 для безградієнтної течії і низької турбулентності потоку (1 %) дозволило отримати базове рівняння, яке описує експериментальні дані (рис. 5) з максимальною похибкою на початковій ділянці, що не перевищує 10 %.

Зовнішня турбулентність ( $\approx 7\%$ ) має несуттєвий вплив на середню ефективність плівкового охолодження пластини. Прискорення потоку в діапазоні зміни параметра градієнта тиску  $K$   $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $3,5 \cdot 10^{-6}$  знижує ефективність охолодження до 25 % ( $m = 0,5$ ). Запропоновано ступеневу залежність для врахування впливу фактору прискорення потоку.

Для визначення фізичної структури потоку була виконана візуалізація поверхневих ліній течії і комп'ютерне моделювання фізичної структури потоку (рис. 6). Дано пояснення поведінки ефективності плівкового охолодження від параметра вдуву. Основними фактором більших значень ефективності плівкового

охолоджувача не відривається від охолоджуваної поверхні по всій довжині (рис. 3 а). При подачі потоку через циліндричні отвори охолоджувач «йде» в основний потік і тому спостерігається зона відриву по всій довжині пластини (рис. 3 б), що істотно знижує ефективність охолодження.

Результати комп'ютерного моделювання та поверхневої візуалізації показали, що основними причинами збільшення ефективності плівкового охолодження є істотне зниження відриву струменя охолоджувача за дворядною системою отворів в поглибленнях і зменшення інтенсивності парного («ниркового») вихору в області подачі вторинного потоку.

У третьому розділі наведені результати експериментального і теоретичного дослідження перспективної схеми парних («антиниркових») вихрових отворів в широкому діапазоні параметра вдуву при наявності турбулентності і прискорення потоку. Отримано нові дані за кількісними і якісними характеристиками даної схеми та нові рівняння.

На рис. 4 наведена схема парних отворів. Основні відносні геометричні параметри:  $t/d = 4$ ,  $t_1/d = 3,125$ ,  $\Delta/d = 1,3$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$ .

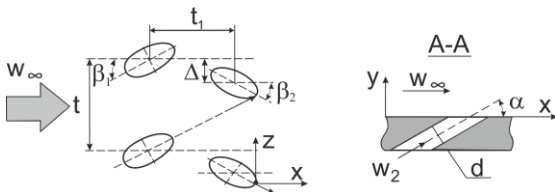


Рис. 4. Схема парних отворів

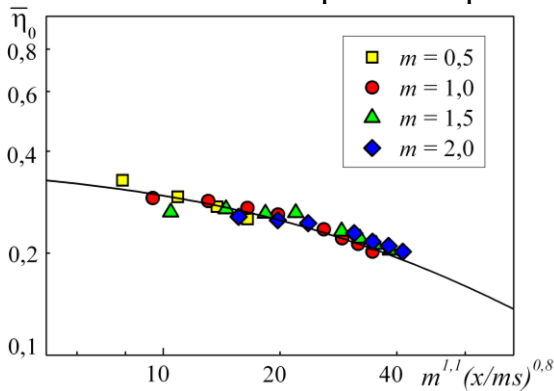
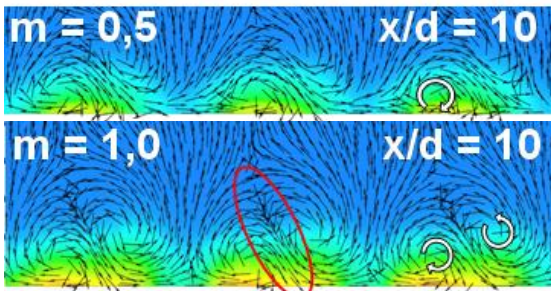
Рис. 5. Результати узагальнення дослідних даних з  $\bar{\eta}_0$  за парними отворами

Рис. 6. Поля температур і проєкції векторів швидкості в поперечних перетинах за парними отворами

поглибленнях і траншеях. У всіх розглянутих варіантах діаметр отворів  $d = 0,5$  мм (рис. 7), відносний крок отворів по висоті  $t/d = 4$ ; кут нахилу отворів до охолоджуваної поверхні  $\beta = 30^\circ$ ; відношення діаметру отворів до діаметру вхідної кромки 0,1. Дослідження виконано в діапазоні зміни параметра вдуву від 0,5 до 2,0 на моделі з циліндричною вхідною кромкою і плоскими стінками за нею, а так само на моделі лопатки в умовах реального міжлопаткового каналу.

Розглянуто три варіанти радіальних систем плівкового охолодження з різними кутами відхилення ряду бокових отворів від центральної лінії ( $\alpha$ : 15, 30 і 45°), визначено його вплив на ефективність плівкового охолодження вхідної кромки і плоскої стінки за нею. Отримано, що для системи радіальних отворів найбільш ефективною, з точки зору плівкового охолодження, є схема з  $\alpha = 15^\circ$ , для якого навіть при  $m = 0,5$  ефективність плівкового охолодження становить 0,48, при  $m = 1,0$  — 0,52, а при  $m = 2,0$  — 0,84. Додатково розглянута система паралельних отворів, яка є більш ефективною в порівнянні з системою радіальних отворів. Так при  $m = 1,0$  для паралельних отворів ефективність плівкового охолодження на ділянці вхідної кромки становить 0,55, в той час як для системи радіальних отворів з  $\alpha = 30^\circ$  вона дорівнює 0,50, а з  $\alpha = 15^\circ$  — 0,52.

Виконано дослідження ефективності плівкового охолодження при подачі охолоджувача через віялові отвори, отвори в напівсферичних поглибленнях, а також

охолодження в порівнянні з традиційною схемою є перетворення «ниркових» вихорів і формування «антиниркової» структури потоку, що притискає потік охолоджувача до поверхні та сприяє його розтіканню в поперечному напрямку, а також перешкоджає надходженню зовнішнього потоку до стінки.

Показано, що при заданих значеннях кутів  $\beta_1$  і  $\beta_2$ , поперечна відстань між отворами  $\Delta$ , має вплив на ефективність плівкового охолодження, яка змінюється по кривій з максимумом. Оптимальне значення  $(\Delta/d)_{\text{опт}}$ , що забезпечує максимум ефективності охолодження, змінюється від 1,5 до 0,7 при збільшенні параметра вдуву від 0,5 до 2,0. Вперше отримано рівняння для  $(\Delta/d)_{\text{опт}}$ . Показано, що максимальне значення ефективності плівкового охолодження забезпечує несиметрична «антиниркова» вихрова структура.

У четвертому розділі виконано дослідження плівкового охолодження вхідних кромek реальних лопаток турбін газотурбінних двигунів при подачі охолоджувача в трирядну систему радіальних, паралельних і віялових отворів, а також отворів, розташованих в напівсферичних



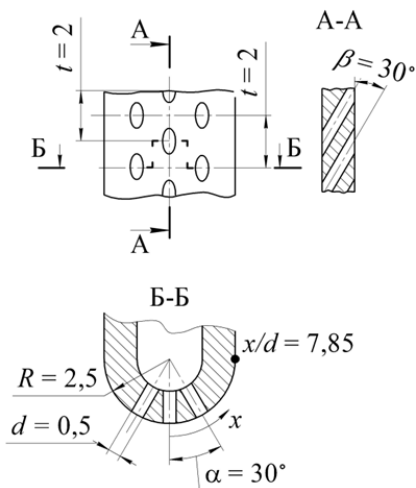


Рис. 7. Конфігурація отворів

Перерозподіл ефективності також обумовлено впливом кривизни поверхні, градієнтами швидкості і тиску на поверхнях лопатки, а також вихороутворенням та відривом охолоджувача від охолоджуваної поверхні з боку корита. Для моделі реальної лопатки, в залежності від величини параметра вдуву, осереднена ефективність плівкового охолодження на ділянці вхідної кромки в 1,6...2,3 рази нижче, ніж на моделі вхідної кромки з плоскими стінками за нею. За вхідною кромкою лопатки середня ефективність на увігнутій поверхні (кориті) в 1,7...2,5 рази

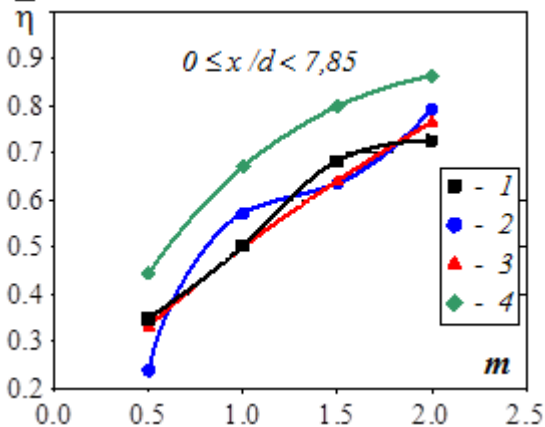


Рис. 8. Ефективність плівкового охолодження на ділянці вхідної кромки: 1 - базовий варіант; 2 - в'ялові отвори; 3 - отвори в напівсферичних поглибленнях; 4 - отвори в траншеях

плівковому охолодженні і ефективності плівкового охолодження за дослідженими системами на вхідній кромці лопатки газових турбін і її середньої частини.

Розрахунок економічної ефективності показав, що використання більш інтенсивних поверхнево-вихрових схем плівкового охолодження лопаток дозволяє знизити витрату охолоджуючого повітря до 20 % і, як наслідок, підвищити ККД ГТД на 2 %, що дає можливість економити близько 5 % паливного природного газу. Для ГТД потужністю 25 МВт при роботі на природному газі, при його вартості 215 \$ за 1000 м<sup>3</sup>, економія коштів складе 2,18 млн. \$ за час до капітального ремонту (25 тис. годин), а для загального ресурсу (100 тис. годин) — 8,72 млн. \$. Застосування досліджених конфігурацій дозволяє також знизити число капітальних ремонтів з чотирьох до трьох, що економить значні фінансові кошти (2,3 млн. \$).

отвори в траншеях, розташованих на вхідній кромці (рис. 8). Вивчено вихрову структуру потоку. На відміну від застосування таких систем на плоскій пластині, збільшення ефективності плівкового охолодження отримано тільки для системи отворів в траншеї.

Досліджено вплив кривизни стінки, градієнтів швидкості і статичного тиску в умовах міжлопаткового каналу на розподіл ефективності плівкового охолодження для радіальної системи. Встановлено, що наявність цих факторів призводить до істотного перерозподілу витрати охолоджувача між рядами отворів і, як наслідок, ефективності плівкового охолодження в порівнянні з моделлю з плоскими стінками, як на вхідній кромці, так і за нею.

нижче, ніж на моделі з плоскою стінкою. На опуклій поверхні (спинці) в 2,5...3,6 вище, ніж на увігнутій поверхні лопатки.

У п'ятому розділі наведено методики розрахунку систем плівкового охолодження лопаток газових турбін з використанням досліджених схем плівкового охолодження. При розробці методики використано результати отримані в роботі, а також результати узагальнення дослідних даних, наведених в літературі.

Наведено загальний підхід до розрахунку теплового потоку до охолоджуваної поверхні лопатки при наявності плівкового охолодження, а також особливості розрахунку тепловіддачі при

## ВИСНОВКИ

1. На основі експериментальних даних в діапазоні зміни параметра вдуву від 0,5 до 2,0 вперше отримано узагальнююче (базове) рівняння для середньої ефективності плівкового охолодження при безградієнтному і низкотурбулентному ( $Tu \approx 1\%$ ) обтіканні плоскої пластини для подачі охолоджувача через отвори в напівсферичних поглибленнях і парні отвори.

2. У діапазоні зміни параметра прискорення  $K$  від  $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $3,5 \cdot 10^{-6}$  для врахування впливу прискорення потоку при розрахунку ефективності плівкового охолодження за отворами в напівсферичних поглибленнях запропоновано до базового рівняння використовувати поправочний коефіцієнт, а для парних отворів запропонована поправка в формі ступеневої залежності. Для обох конфігурацій прискорення потоку знижує ефективність плівкового охолодження.

3. Показано, що для досліджених конфігурацій зовнішня турбулентність ( $Tu \approx 7\%$ ) має незначний вплив на середню ефективність плівкового охолодження за отворами в напівсферичних поглибленнях і за парними отворами.

4. Основними факторами більш високої ефективності плівкового охолодження за отворами в напівсферичних поглибленнях, в порівнянні з традиційною схемою, є істотне зниження зони відриву охолоджувача від поверхні охолодження і зменшення інтенсивності «ниркового» вихору в області його подачі.

5. Основними факторами більш високої ефективності плівкового охолодження за системою парних отворів в порівнянні з традиційною схемою при  $m \leq 1,0$  є формування «антиниркової» вихрової структури з поперечним розтіканням охолоджувача біля поверхні, яка перешкоджає надходженню зовнішнього потоку до стінки, що охолоджується.

6. При подачі охолоджувача через систему радіальних отворів на вхідний кромці моделі з плоскою стінкою отримано, що найбільш ефективним з точки зору охолодження є розташування ряду бокових отворів під кутом  $\alpha = 15^\circ$ . Система паралельних отворів на вхідний кромці моделі з плоскою стінкою показала кращі результати з точки зору ефективності плівкового охолодження, ніж система радіальних отворів.

7. При подачі охолоджувача в поверхневі поглиблення на вхідній кромці лопатки найбільш ефективною є система отворів в траншеї. В цьому випадку ефективність плівкового охолодження, осереднена за всіма параметрами вдуву, становить 0,69, що на 23 % вище, ніж для системи радіальних отворів.

8. Для системи радіальних отворів показано, що наявність факторів, що мають місце в міжлопатковому каналі реальної лопатки (змінна кривизна поверхні, градієнти швидкості і тиску), призводить до істотного зниження ефективності плівкового охолодження на вхідній кромці і її перерозподілу між ділянкою спинки і корита в порівнянні з моделлю з плоскими стінками.

9. Результати роботи у формі методик розрахунку впроваджені у Державному підприємстві Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект» (м. Миколаїв), в Інституті технічної теплофізики НАНУ при розробці теоретичних основ поверхнево-вихрових систем, а також в навчальному процесі Фізико-технічного інституту НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» (спеціалізація «фізика новітніх джерел енергії»), що підтверджено актами впровадження і використання; вони також рекомендовані до використання в ДП

«Івченко-Прогрес» (м. Запоріжжя) та можуть бути використані в провідних газотурбінних компаніях США, Великобританії, Франції та інших країн («General Electric», «Pratt & Whitney», «Solar Turbines», «Rolls-Royce», «SNECMA»).

Роботи авторів добре відомі науковій громадськості. Отримані нові наукові результати (фізична природа течії і теплообміну, нові рівняння, адекватні моделі турбулентності) відповідають світовому рівню знань в даній області, вони вносять першорядний внесок в теорію теплообміну і теорію поверхнево-вихрових систем. Основна перевага результатів цієї роботи в порівнянні із зарубіжними аналогами – простіша (і більш дешева) технологія виготовлення досліджених конфігурацій, причому вони не поступаються кращим зарубіжним аналогам за ефективністю плівкового охолодження; також врахування практично важливих чинників в методиці розрахунку систем охолодження лопаток газових турбін, таких як зовнішня турбулентність потоку, прискорення потоку та ін. В даний час результати подібного рівня в світовій науковій літературі відсутні.

**Кількість публікацій:** 52, в т.ч. 25 статей (23 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних (SCOPUS, Web of Science, Index Copernicus, Google Scholar, INSPEC, Ulrich's Periodicals Directory, РИНЦ)), 26 тез доповідей у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій, 1 методичний посібник . **Загальна кількість реферованих публікацій згідно з базою даних Google Scholar – 36, зокрема, в базі SCOPUS – 2, загальний індекс цитування – 12, h-індекс – 3 (за роботою).** Новизну та конкурентоспроможність технічних рішень захищено 1 патентом. Захищено 3 кандидатських дисертацій.

\_\_\_\_\_ / Н.А. Панченко/  
(підпис)

\_\_\_\_\_ / М.В. Безлюдна/  
(підпис)

\_\_\_\_\_ / В.Ю. Петельчиц/  
(підпис)

Вчений секретар ІТТФ НАНУ,  
к.т.н.

\_\_\_\_\_

О.І. Чайка