

Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики

ПЕТЕЛЬЧИЦ ВІКТОРІЯ ЮРІЇВНА

УДК 621.438-226.2:536.24

**ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ
ВХІДНИХ КРОМОК ЛОПАТОК ГАЗОВИХ ТУРБІН**

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

КИЇВ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики НАН України у відділі високотемпературної термогазодинаміки.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
академік НАН України,
Халатов Артем Артемович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
завідувач відділу високотемпературної термогазодинаміки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Кривошей Фелікс Олександрович,
Київська державна академія водного транспорту імені
гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного МОН України,
завідувач кафедри суднових енергетичних установок,
допоміжних механізмів суден та їх експлуатації

доктор технічних наук, професор
Тарасов Олександр Іванович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
професор кафедри турбінобудування

Захист відбудеться «20» жовтня 2016 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 в Інституті технічної теплофізики НАН України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Желябова, 2а.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту технічної теплофізики НАН України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Желябова, 2а.

Автореферат розісланий «14» вересня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01,
доктор технічних наук



Ж.О. Петрова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Газотурбінні двигуни (ГТД) широко використовуються в авіації, енергетиці, корабельних силових установках, як привід нагнітачів газотранспортних систем, а також в технологічних циклах деяких хімічних виробництв.

Основними вимогами до всіх ГТД, незалежно від їх призначення, є висока економічність, експлуатаційна надійність і тривалий ресурс роботи. Основним способом підвищення економічності ГТД було і залишається зростання температури газу перед турбіною, яка в сучасних ГТД досягає 1500...1600 °С, що значно перевищує допустимий рівень температур сучасних жаростійких сплавів, які використовуються для виготовлення соплових і робочих лопаток. У зв'язку з цим, для забезпечення їх працездатності застосовуються високоефективні системи повітряного охолодження.

Як показує досвід проектування ГТД, незважаючи на розвиток внутрішніх (конвективних) систем охолодження, забезпечити необхідну глибину охолодження лопаток перших ступенів турбіни неможливо без використання зовнішнього (плівкового) охолодження, коли охолоджувач подається на охолоджувані поверхні з метою відтискання від них гарячого газу. Застосування плівкового охолодження приводить до додаткових термодинамічних і газодинамічних втрат, тому питання досягнення його максимальної ефективності при мінімальних витратах охолоджувача стоїть дуже гостро.

В галузі плівкового охолодження проведено дуже великий обсяг досліджень, з яких слід виділити роботи Гольдштейна Р.Дж., Дітмара Дж., Себана Р.А., Богарда Д.Дж, Еккерта Є.Р., Банкера Р.С., Ліграні П.М. (США), Вітхарда К., Балдауфа С., Шульца А. (Німеччина). У країнах колишнього СРСР основні роботи по дослідженню плівкового охолодження виконані в Інституті теплофізики СВ РАН (Волчков Е.П., Кутетеладзе С.С., Леонтьєв А.І.). В Україні дослідження плівкового охолодження проводилися в Інституті технічної теплофізики НАН України (Дибан Є.П., Репухов В.М., Халатов А.А.), Київському ВВАІУ, Національному технічному університеті «ХПІ» (м. Харків), ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» (м. Миколаїв), ДП «Івченко-Прогрес» (м. Запоріжжя).

Основна частина цих робіт присвячена дослідженню закономірностей плівкового охолодження на плоскій поверхні з урахуванням впливу різних факторів. Ряд досліджень спрямований на вивчення можливості підвищення ефективності за рахунок застосування інноваційних схем – віялових, парних та інших типів отворів, а також поверхневих поглиблень.

Ділянка вхідної кромки є найбільш термічно навантаженим елементом профілю лопатки турбіни, що обумовлено, з одного боку, високою інтенсивністю теплообміну з боку газу в зоні гальмування потоку, а з іншого – меншою площею теплообмінної поверхні з боку охолоджувача. Застосування плівкового охолодження для цієї області особливо актуально. Структура потоку при подачі охолоджувача на вхідну кромку істотно відрізняється від структури, що формується біля плоскої поверхні. Це викликано наявністю зони гальмування потоку, суттєви-

ми градієнтами швидкості та статичного тиску. З цієї причини використання даних, отриманих на плоскій поверхні, для розрахунку плівкового охолодження на циліндричній поверхні є некоректним. У відкритій літературі недостатньо робіт, присвячених вибору розташування рядів отворів плівкового охолодження на вхідний кромці, використанню поверхневих поглиблень, ефективності плівкового охолодження на криволінійних поверхнях на віддаленні від місця вдуву.

Таким чином, питання подальшого вдосконалення систем плівкового охолодження вхідних кромek лопаток газових турбін, вивчення структури потоку і отримання узагальнюючих залежностей є *актуальним науковим і практичним напрямком*, що має велике значення для газотурбобудування та інших високотемпературних енергетичних систем.

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 дисертації, використані в держбюджетній НДР № 1.7.1.853 Дослідження поверхнево-вихрових систем для інтенсифікації теплообміну і підвищення ефективності охолодження поверхонь в перспективних ГТД» (ІТТФ НАН України, номер державної реєстрації 0112U002042).

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – вдосконалення плівкового охолодження вхідних кромek лопаток газових турбін при подачі охолоджувача через трирядну систему циліндричних отворів: віялових отворів, отворів у напівсферичних поглибленнях і траншеях; визначення фізичної структури потоку і залежностей, що характеризують ефективність плівкового охолодження.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні *задачі дослідження*:

– для моделі з циліндричною вхідною кромкою і плоскими стінками за нею визначити ефективність плівкового охолодження при подачі охолоджувача через систему радіальних циліндричних отворів з кутом відхилення бокових рядів отворів від центральної лінії 15, 30 і 45°, а також через систему паралельних отворів;

– для моделі з циліндричною вхідною кромкою і плоскими стінками за нею визначити ефективність плівкового охолодження для інноваційних схем плівкового охолодження з подачею охолоджувача через віялові отвори, отвори в напівсферичних поглибленнях і в траншеях;

– для моделі вхідної кромки реальної лопатки з профільованими (криволінійними) поверхнями за нею визначити вплив факторів, що мають місце в реальному міжлопатковому каналі, на розподіл ефективності плівкового охолодження при подачі охолоджувача на ділянці вхідної кромки через систему радіальних циліндричних отворів.

Для отримання загальних висновків щодо ефективності обраних систем плівкового охолодження дослідження виконати для чотирьох значень параметра

вдуву $m = 0,5; 1,0; 1,5$ і $2,0$, що перебувають у важливому для практичного застосування діапазоні.

Об'єкт дослідження – процеси теплообміну і гідродинаміки при плівковому охолодженні типової моделі вхідної кромки з плоскими стінками за нею і профілю реальної лопатки при подачі охолоджувача через трирядну традиційну систему отворів та інноваційні системи плівкового охолодження.

Предмет дослідження – фактори, що впливають на ефективність плівкового охолодження вхідної кромки і фізичну структуру потоку при подачі охолоджувача через трирядну систему радіальних циліндричних отворів, паралельні і віялові отвори, отвори в напівсферичних поглибленнях і траншеях.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети використано метод комп'ютерного моделювання з використанням програмного пакету ANSYS CFX 14.5.

Достовірність отриманих результатів забезпечена:

- коректним застосуванням (відповідність використаних моделей турбулентності, виконання вимог і рекомендацій щодо моделювання) програмного забезпечення, що має міжнародний сертифікат якості ISO 9001:2008;
- задовільним узгодженням результатів тестових розрахунків з апробованими експериментальними даними, опублікованими в літературі.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше показано, що в діапазоні зміни параметра вдуву від $0,5$ до $2,0$ при подачі охолоджувача через систему радіальних циліндричних отворів на циліндричній вхідній кромці моделі з плоскими стінками за нею, найбільш ефективним є розташування ряду бокових отворів під кутом $\alpha = 15^\circ$ від центральної лінії;

- вперше в діапазоні зміни параметра вдуву від $0,5$ до $2,0$ виконано порівняння ефективності систем радіальних і паралельних отворів на моделі циліндричної вхідної кромки з плоскими стінками за нею і показано, що система паралельних отворів є більш ефективною з точки зору ефективності плівкового охолодження при $m > 0,5$;

- вперше в діапазоні зміни параметра вдуву від $0,5$ до $2,0$ досліджено інноваційні системи плівкового охолодження з подачею охолоджувача через віялові отвори, отвори в напівсферичних поглибленнях і в траншеях на моделі з циліндричною вхідною кромкою і плоскими стінками за нею і отримано відповідні залежності;

- вперше для системи радіальних циліндричних отворів на вхідній кромці моделі реальної лопатки показано, що фактори, які відбуваються в реальному міжлопатковому каналі (кривизна поверхні, градієнт тиску), приводять до перерозподілу охолоджувача між рядами отворів і зміни в розподілі ефективності плівкового охолодження на вхідній кромці і за нею, порівнюючи з моделлю з плоскими стінками;

- вперше отримано наукові дані, що характеризують фізичну структуру потоку та особливості плівкового охолодження при подачі охолоджувача через

трирядну систему радіальних циліндричних отворів, віялові отвори, отвори в напівсферичних поглибленнях і траншеях.

Практичне значення отриманих результатів. Сформульовано рекомендації щодо вдосконалення існуючих та застосування інноваційних систем плівкового охолодження вхідних кромки лопаток газових турбін. Визначено найбільш ефективні способи розташування рядів отворів в системі плівкового охолодження вхідної кромки, надано рекомендації з вибору діапазону параметра вдуву. Сформульовано рекомендації з комп'ютерного моделювання (використання сіток, моделей турбулентності), що дозволяє детально визначити температурний стан лопатки на етапі її проектування і, тим самим, підвищити надійність її роботи в умовах експлуатації.

Отримані в дисертації результати використано при проектуванні системи охолодження і розрахунку температурного стану соплових лопаток турбіни високого тиску розробляемого ГТД, а також при розробці робочої лопатки турбіни високого тиску для серійних двигунів типу ДН80 виробництва Державного підприємства Науково-виробничого комплексу газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект» (акт впровадження від 21.06.2016).

Особистий внесок здобувача. Здобувачем створено розрахункові моделі та виконано числені дослідження впливу розміщення отворів плівкового охолодження і реальних факторів експлуатації на ефективність плівкового охолодження лопатки при варіюванні параметра вдуву. Виконано обробку і аналіз отриманих результатів, отримано узагальнюючі залежності.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи обговорювалися і отримали схвалення на VI і VII Міжнародних науково-технічних конференціях студентів, аспірантів, вчених і фахівців «Судова енергетика: стан та проблеми» (м. Миколаїв, 2013, 2015); на II та III Міжнародних науково-технічних конференціях студентів, аспірантів, вчених і фахівців «Сучасний стан та проблеми двигунобудування» (м. Миколаїв, 2012, 2014); XVIII Міжнародному конгресі двигунобудівників (п. Рибачьє, АР Крим, 2013); V Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні технології в газотурбобудування» (м. Алушта, АР Крим, 2013); X і XI Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми енергозбереження та шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2014, 2015); XII Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетичні та теплотехнічні процеси і устаткування» (м. Харків, 2016).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 11 наукових праць: 5 статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних (Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, Google Scholar, РИНЦ) і наукової електронної бібліотеки eLIBRARY.RU; 1 стаття в зарубіжному виданні (Російська Федерація); 5 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків і додатку. Загальний обсяг роботи становить 142 сторінки, з яких 5 сторінок займають рисунки, всього 61 рисунок і 4 таблиці, 2 сторінки – додаток, 11 сторінок – список використаних джерел (104 найменування).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Наведено дані про особистий внесок автора, апробацію результатів і публікації результатів роботи.

У **першому розділі** виконано огляд систем охолодження лопаток сучасних ГТД. Виконано аналіз застосування плівкового охолодження в лопатках газових турбін, а також способів підвищення його ефективності. Розглянуто особливості застосування плівкового охолодження на вхідних кромках лопаток турбіни високотемпературних ГТД. Наведений огляд показав актуальність і велике практичне значення подальших досліджень у цьому напрямку. Дослідження проведено при незмінних значеннях діаметра і кроку отворів плівкового охолодження, обраних на основі виконаного огляду, для ділянки вхідної кромки і за однакових параметрів основного потоку.

Для дослідження прийнято геометричні розміри (рис. 1) і основні газодинамічні параметри характерні для робочої лопатки турбіни високого тиску високотемпературного ГТД: діаметр отворів $d = 0,5$ мм, відносний крок отворів в поперечному напрямку $t/d = 4$; кут нахилу отворів до охолоджуваної поверхні $\beta = 30^\circ$; відношення діаметра отворів до діаметра вхідної кромки $d/2R = 0,1$. Для отворів у напівсферичних поглибленнях діаметр поглиблень становив $D = 1,25$ мм ($d/D = 0,4$), глибина $h = 0,625$ мм ($h/D = 0,5$). Для отворів у траншеї, її ширина дорівнює діаметру отвору $s = d = 0,5$ мм, а глибина $h = d/2 = 0,25$ мм. Ці параметри також відповідають параметрам, широко дослідженим на плоскій пластині різними авторами.

Відповідно до мети та поставлених задач дослідження складено карту виконання дослідницьких розрахунків. На рис. 2 наведено всі досліджувані конфігурації і варіанти.

У **розділі 2** надано теоретичні основи CFD-моделювання, дано опис використаного програмного забезпечення, наведено результати тестових розрахунків ефективності плівкового охолодження при подачі охолоджувача на плоску і циліндричну поверхні. Розглянуто методику виконання та обробки результатів розрахунків, описано геометричну модель, розрахункову сітку та розрахункову модель.

В роботі тестові розрахунки виконано для двох варіантів плівкового охолодження: плоскої поверхні і вхідної кромки з подальшою плоскою ділянкою, які максимально наближені до досліджуваних в даній роботі варіантів. Верифікація виконана на різних розрахункових сітках і при різних моделях турбулентності.

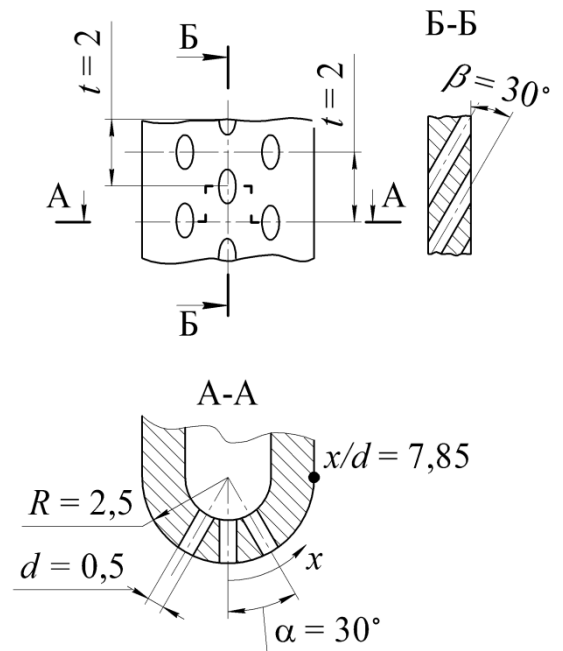


Рис. 1. Конфігурація отворів

Визначено параметри розрахункових моделей, що забезпечують найкращу відповідність результатів розрахунків до експериментальними даними, а отримана при цьому різниця між результатами розрахунків і експериментальними даними характеризує очікувану похибку моделювання.

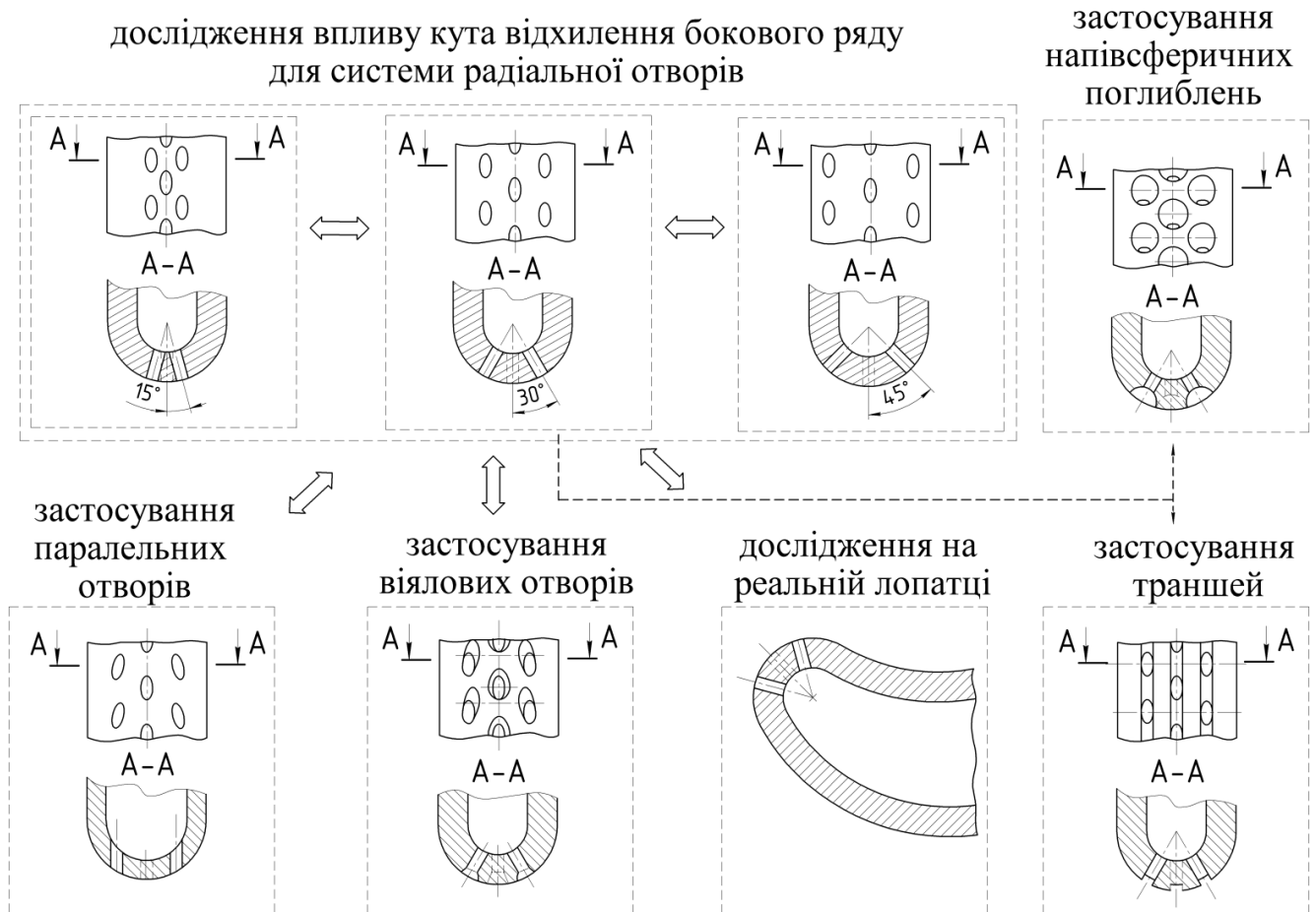


Рис. 2. Карта виконання дослідницьких розрахунків

Для варіанту плівкового охолодження плоскої поверхні в якості експериментальних даних використані запозичені з літератури результати досліджень (Балдауф С. ASME Paper – 2002) осередненої в поперечному напрямку ефективності плівкового охолодження на плоскій поверхні за однорядною системою циліндричних отворів. З великого обсягу експериментальних даних для моделювання обрано варіант з близькими до роботи геометричними параметрами при трьох значеннях параметра вдуву $m = 0,5; 1,0; 1,4$.

В якості експериментальних даних для варіанту вхідної кромки з подальшою плоскою ділянкою використано результати досліджень (Мік В.Дж., Мейл Р.Е. Сучасне машинобудування – 1989) осередненої в поперечному напрямку ефективності плівкового охолодження за трьома рядами циліндричних отворів в районі вхідної кромки при трьох значеннях параметрів вдуву $m = 0,38; 0,64$ і $0,97$.

У тестових розрахунках були використані найбільш часто застосовувані для розрахунків теплових задач *RANS* моделі турбулентності (*k-ε*, *RNG k-ε*, *BSL* та *SST*), моделі турбулентності типу *Reynolds stress*, що враховують анізотропію турбулентної в'язкості, моделі турбулентності з урахуванням анізотропії дифузії, а також *DES*-моделювання.

На підставі цього для виконання дослідницьких розрахунків була обрана *SST* модель турбулентності, яка для обох варіантів забезпечила найменші відхилення результатів розрахунку ефективності плівкового охолодження від експериментальними даними в розглянутому діапазоні значень параметра вдуву, що не перевищує 8 %.

Всі дослідницькі розрахунки виконано в стаціонарній постановці. Для моделювання були створені 3D моделі, що включають в себе область течії основного потоку (газу), порожнину підведення охолоджувача та отвори плівкового охолодження. Висота геометричної моделі дорівнює двом крокам отворів і містить по два отвори в трьох рядах. Для оцінки впливу розглянутих факторів на ефективність плівкового охолодження не тільки на вхідний кромці, а й на значній частині профілю, геометрична модель виконана з подовженою плоскою ділянкою, яка забезпечує аналіз результатів до $x/d = 100$ (x – відстань від центральної лінії).

Для кожної геометричної моделі за допомогою ANSYS ICEM CFD 14.5 були створені тетраедричні розрахункові сітки зі згущенням в районі отворів плівкового охолодження і призматичним підшаром поблизу стінок. Розрахункові сітки, залежно від конфігурації отворів плівкового охолодження, містять від 20 до 22 млн. елементів.

В якості граничних умов для розрахунків задавалися параметри, характерні для РЛ турбіни високого тиску:

- швидкість основного потоку на вході відповідає числу Рейнольдса, що визначено за діаметром вхідної кромки, рівному 50 000;
- статичний тиск основного потоку на виході 1,2 МПа;
- температура основного і охолоджуючого потоку 1500 і 600 °С відповідно;

Витрата охолоджувача задавалась відповідно до одного з чотирьох значень параметра вдуву $m = 0,5; 1,0; 1,5$ і $2,0$, який в даному випадку визначався як:

$$m = \frac{G_{OX} / (N_{OTB} \cdot F_{OTB})}{\rho_r C_r},$$

де ρ_r, C_r – відповідно густина і швидкість основного потоку (газу) на вході в розрахункову модель;

G_{OX} – сумарна витрата охолоджувача через шість отворів;

F_{OTB} – площа поперечного перерізу одного отвору;

N_{OTB} – кількість отворів плівкового охолодження в моделі ($N_{OTB} = 6$).

Моделювання виконано з використанням моделі ідеального газу. Основний потік і охолоджувач були задані як повітря зі змінними від температури властиво-

стями (коефіцієнт теплопровідності (λ), коефіцієнт динамічної в'язкості (μ) і теплоємність (c_p)).

За результатами розрахунку в кожній точці охолоджуваної поверхні визначалася локальна ефективність плівкового охолодження:

$$\eta' = \frac{T_{\Gamma} - T_{CT}}{T_{\Gamma} - T_{OX}},$$

де T_{Γ} , T_{OX} – повні температури основного потоку (газу) і охолоджувача відповідно;

T_{CT} – температура стінки.

Для аналізу розподілу ефективності плівкового охолодження в поздовжньому напрямку використана осереднена в поперечному напрямку ефективність плівкового охолодження:

$$\eta = \frac{1}{2t} \int_0^{2t} \eta' dz,$$

де t – крок отворів в поперечному напрямку.

У роботі також проаналізовано ефективність плівкового охолодження, осереднена на характерних ділянках розрахункової моделі (рис. 1): на циліндричній ділянці вхідної кромки ($0 < x/d \leq 7,85$) і плоскій стінці за нею ($7,85 < x/d \leq 100$).

У розділі 3 виконані дослідження різних конфігурацій отворів плівкового охолодження розташованих на ділянці вхідної кромки: а) радіальні циліндричні отвори з кутом відхилення бокового ряду отворів від центральної лінії $\alpha = 15, 30$ і 45° ; б) паралельні циліндричні отвори; в) радіальні віялові отвори; г) циліндричні отвори в напівсферичних поглибленнях, д) циліндричні отвори в траншеях.

Для оцінки ефективності плівкового охолодження досліджених систем їх результати порівнювалися з результатами, отриманими для системи радіальних отворів при $\alpha = 30^\circ$. Дослідження виконані для чотирьох значень параметра вдуву $m = 0,5; 1,0; 1,5$ і $2,0$.

Система радіальних отворів. За результатами моделювання (рис. 3) системи радіальних отворів з різними кутами відхилення бокового ряду отворів від центральної лінії: $\alpha = 15^\circ$ ($x/d = 1,31$), $\alpha = 30^\circ$ ($x/d = 2,62$) і $\alpha = 45^\circ$ ($x/d = 3,93$), встановлено, що збільшення параметра вдуву приводить до зростання ефективності плівкового охолодження.

Найменша ефективність плівкового охолодження отримана для варіанту з $\alpha = 45^\circ$ при $m = 0,5$ (рис. 3 з), для якого тиск на виході з отвору мінімальний, за рахунок цього охолоджувач виходить тільки через боковий ряд отворів, а в центральний ряд отворів втікає основний потік (газ). Для даного варіанту плівкове охолодження на ділянці від центральної лінії ($x/d = 0$) до бокового ряду отворів ($x/d = 3,93$) фактично відсутнє.

Найбільшу ефективність плівкового охолодження ділянки вхідної кромки для всіх параметрах вдуву забезпечує варіант з $\alpha = 15^\circ$. У цьому випадку навіть при $m = 0,5$ відсутнє підтікання основного потоку через центральний ряд, а ефективність плівкового охолодження на ділянці вхідної кромки становить 0,48. При $m = 2,0$ ефективність плівкового охолодження досягає 0,84.

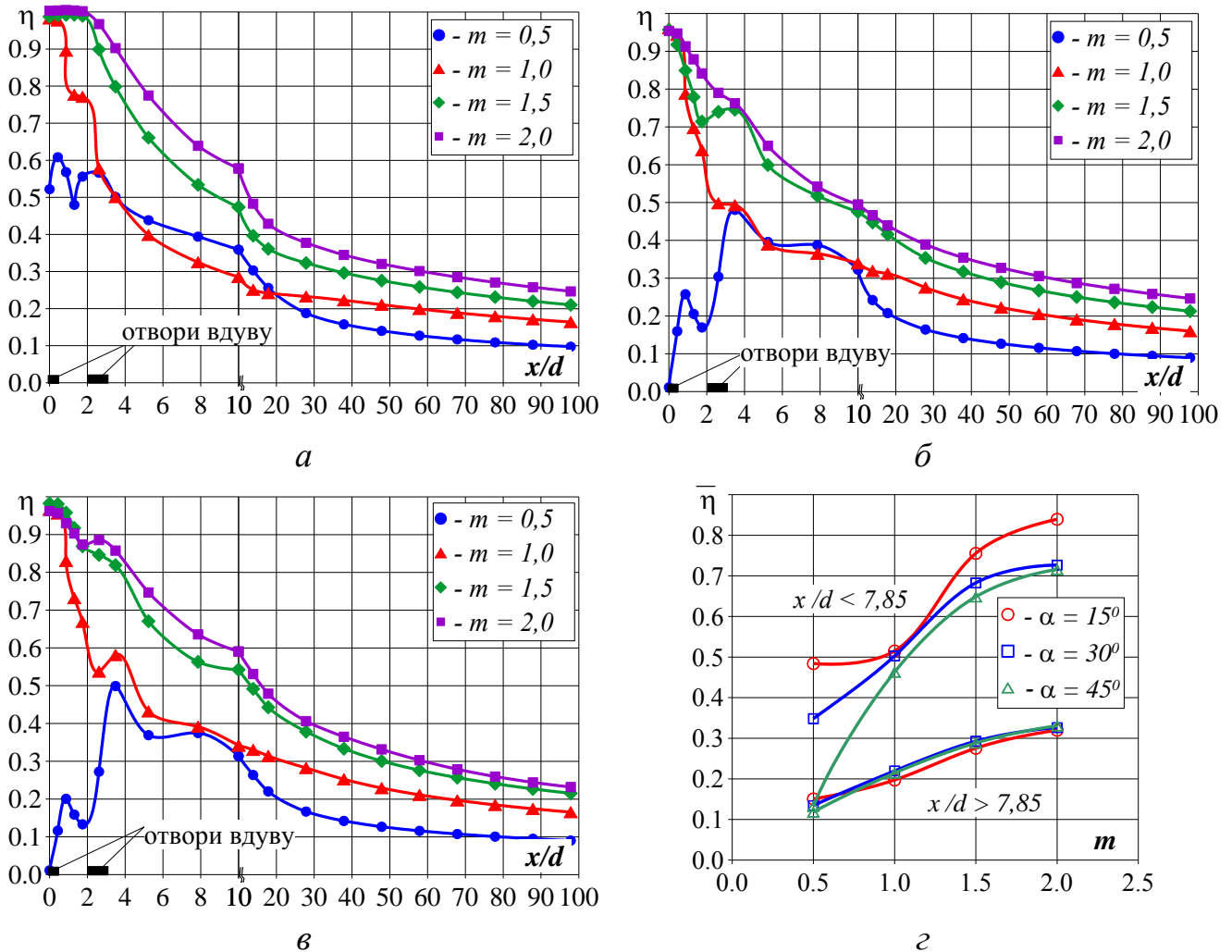


Рис. 3. Ефективність плівкового охолодження системи радіальних циліндричних отворів при $\alpha = 15^\circ$ (а); $\alpha = 30^\circ$ (б); $\alpha = 45^\circ$ (в) і осереднена ефективність плівкового охолодження на ділянці циліндричної вхідної кромки і плоскої ділянки за нею (г)

На рис. 4 наведено розподіл відносного тиску вздовж досліджуваної поверхні. Як видно з рисунка, для центрального ряду отворів величина відносного тиску максимальна, а для варіанту з $\alpha = 45^\circ$ відносний тиск на виході з отворів має мінімальне значення.

При збереженні загального параметра вдуву, що визначає сумарну витрату охолоджувача через три ряди отворів, за рахунок зниження тиску на виході з отворів бокового ряду, відбувається збільшення витрати повітря через цей ряд отворів і зниження витрати через центральний ряд.

Збільшення параметра вдуву з 0,5 до 1,0 для $\alpha = 45^\circ$ приводить до виключення підтікання основного потоку і забезпечує видув охолоджувача через отвори центрального ряду і «провал» ефективності охолодження поблизу центральної лінії, який відбувався при $m = 0,5$, зникає.

В таблиці 1 наведено значення локальних параметрів вдуву для центрального і бокового рядів отворів для трьох досліджених кутів, що розподіляються аналогічно витраті охолоджувача при зміні параметра вдуву від 0,5 до 2,0. При малому куті відхилення ряду бокових отворів ($\alpha = 15^\circ$) локальні значення параметра вдуву близькі між собою, а при $\alpha = 45^\circ$ різниця між ними максимальна.

Аналізуючи характер впливу параметра вдуву на ефективність плівкового охолодження, слід зазначити, що для ділянки вхідної кромки моделі при $m > 1,5$ зростання ефективності плівкового охолодження різко сповільнюється, незважаючи на збільшення витрати охолоджувача.

Система паралельних отворів розглянута як більш технологічна альтернатива системі радіальних отворів. Відстань між рядами отворів на поверхні вхідної кромки прийнята відповідно до системи радіальних отворів при $\alpha = 30^\circ$.

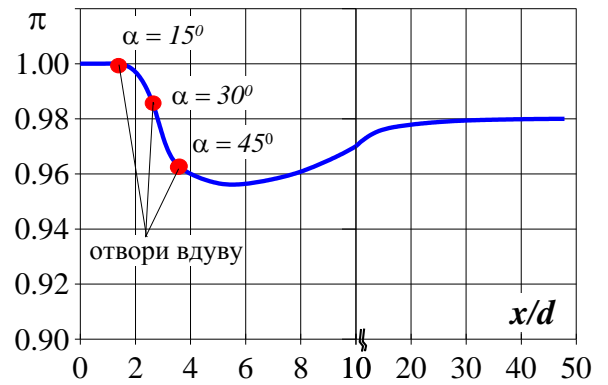


Рис.4. Розподіл відносного тиску вздовж досліджуваної поверхні

Таблиця 1
Значення локальних параметрів вдуву

m	$\alpha = 15^\circ$		$\alpha = 30^\circ$		$\alpha = 45^\circ$	
	Центральний ряд	Боковий ряд	Центральний ряд	Боковий ряд	Центральний ряд	Боковий ряд
0,5	0,43	0,53	0,08	0,71	-0,15	0,88
1,0	0,94	1,03	0,80	1,10	0,59	1,20
1,5	1,46	1,53	1,34	1,57	1,22	1,64
2,0	1,99	2,01	1,87	2,06	1,77	2,11

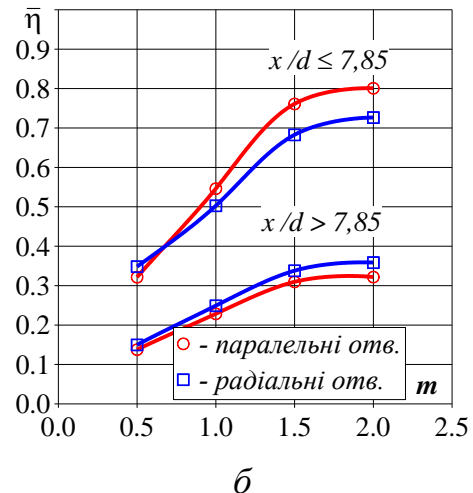
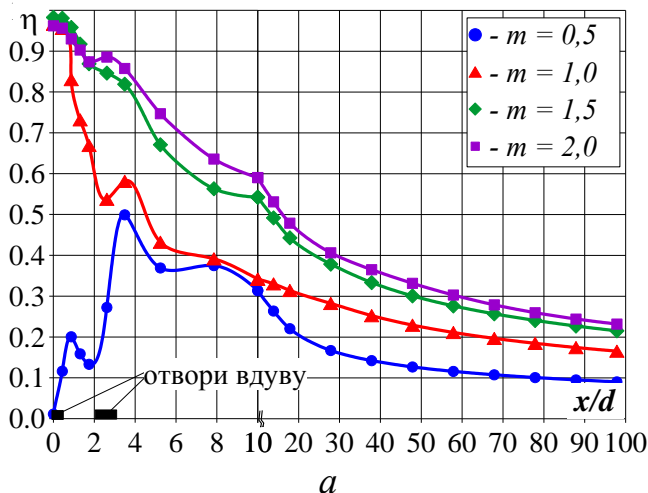
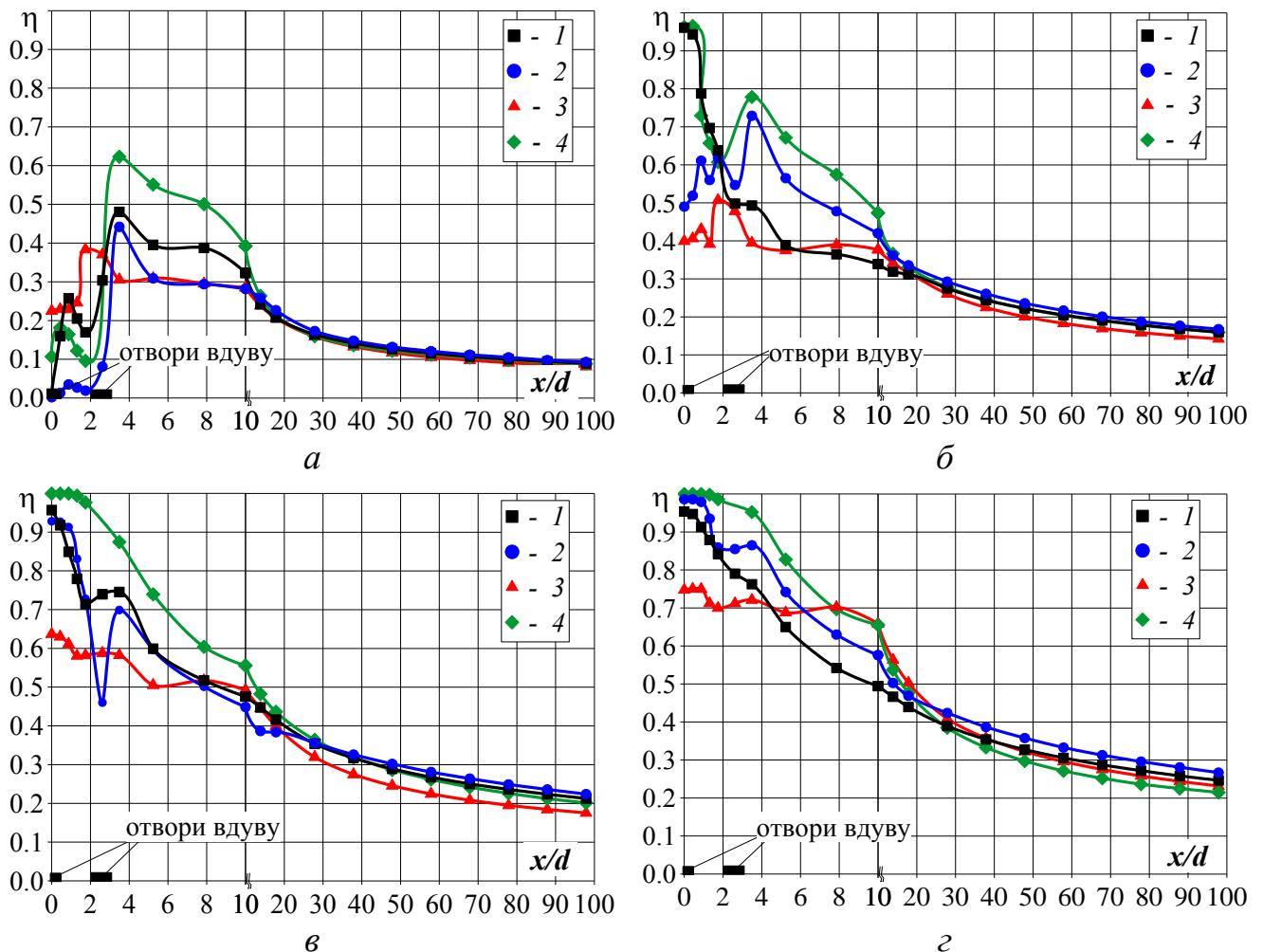


Рис.5. Ефективність плівкового охолодження для системи паралельних отворів (а) і осереднена ефективність для двох варіантів отворів (б)

Зі зростанням параметра вдуву локальна ефективність плівкового охолодження на вхідній кромці та за нею зростає (рис. 5 а). Для варіанту з паралельними отворами при $m = 0,5$ (рис. 5 б), ефективність плівкового охолодження, осереднена на ділянці вхідної кромки, становить 0,32, що трохи нижче, ніж для системи радіальних отворів (0,35). Для плоскої ділянки моделі ці величини близькі між собою. При всіх інших параметрах вдуву ефективність охолодження для паралельних отворів вище.

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 при $\alpha = 30^\circ$ вона дорівнює 0,50, а при $\alpha = 15^\circ$ – 0,52.

Віялові отвори і отвори в поглибленнях. На рис 6, в порівнянні з системою радіальних отворів з $\alpha = 30^\circ$, наведено результати розрахунків розподілу осередненої в поперечному напрямку ефективності плівкового охолодження для системи віялових отворів; отворів в напівсферичних поглибленнях і в траншеях.



1 – базовий варіант; 2 – віялові отвори;
3 – отвори в напівсферичних поглибленнях; 4 – отвори у траншеях

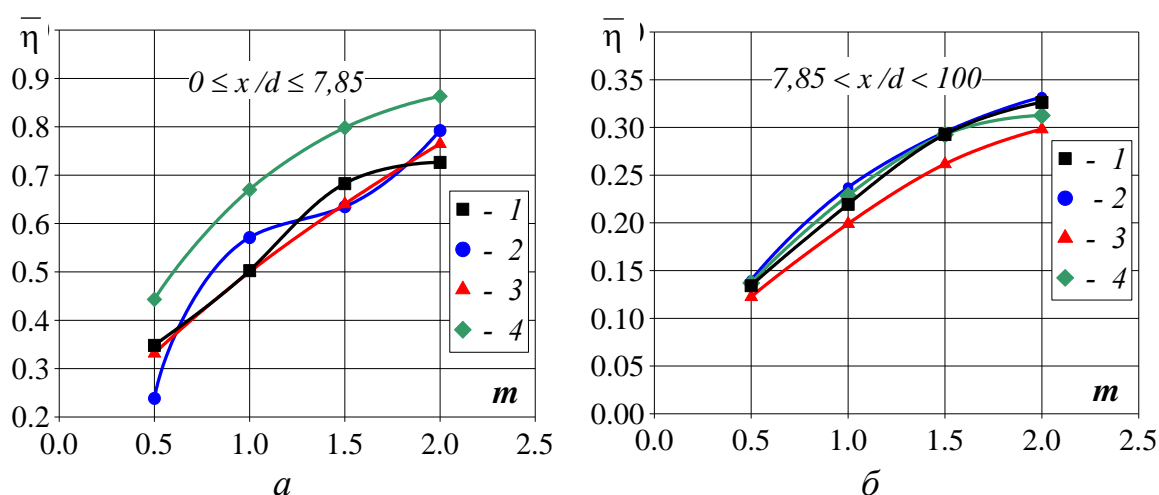
Рис.6. Ефективність плівкового охолодження інноваційних систем:
 $m = 0,5$ (а); $m = 1,0$ (б); $m = 1,5$ (в); $m = 2,0$ (г)

Осереднення ефективності плівкового охолодження виконувалося не тільки по циліндричній поверхні вхідної кромки, але і по поверхні напівсферичних поглиблень і траншеї.

Збільшення параметра вдуву (рис. 7) від 0,5 до 2,0 приводить до зростання середньої ефективності плівкового охолодження для всіх досліджуваних варіантів як на ділянці вхідної кромки, так і на плоскій ділянці за нею. Максимальний приріст осередненої ефективності плівкового охолодження з 0,24 до 0,57 на ділянці вхідної кромки спостерігається для віялових отворів при збільшенні параметра вдуву від 0,5 до 1,0, і перевищує значення для базового варіанту на 14 % (0,07).

Найбільше значення ефективності плівкового охолодження на ділянці вхідної кромки для всіх параметрів вдуву отримано для отворів у траншеях, яке істотно вище, ніж у базовому варіанті. Осереднена величина ефективності плівкового охолодження на ділянці вхідної кромки за всіма параметрами вдуву для отворів у траншеях досягає 0,69, що на 23 % вище, ніж для базового варіанту (0,56).

Для отворів у напівсферичних поглибленнях значення ефективності плівкового охолодження на ділянці вхідної кромки нижче, ніж для базового варіанту, виняток становить величина $m = 2,0$. Причиною зниження ефективності плівкового охолодження є інтенсивне перемішування охолоджувача з гарячим потоком в поглибленні (рис. 8). При аналізі структури течії видно, що на відміну від плоскої пластини, на циліндричній ділянці вхідної кромки відсутній відрив струменя охолоджувача від охолоджуваної поверхні.

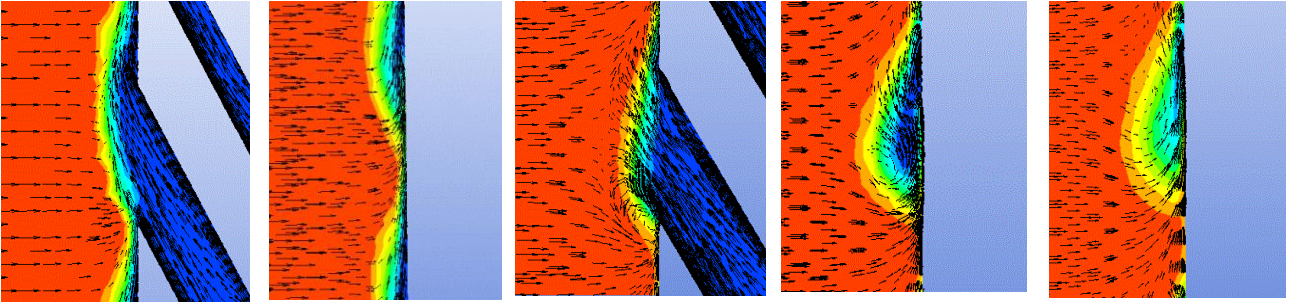


1 – базовий варіант; 2 – віялові отвори;
3 – отвори в напівсферичних поглибленнях; 4 – отвори в траншеях

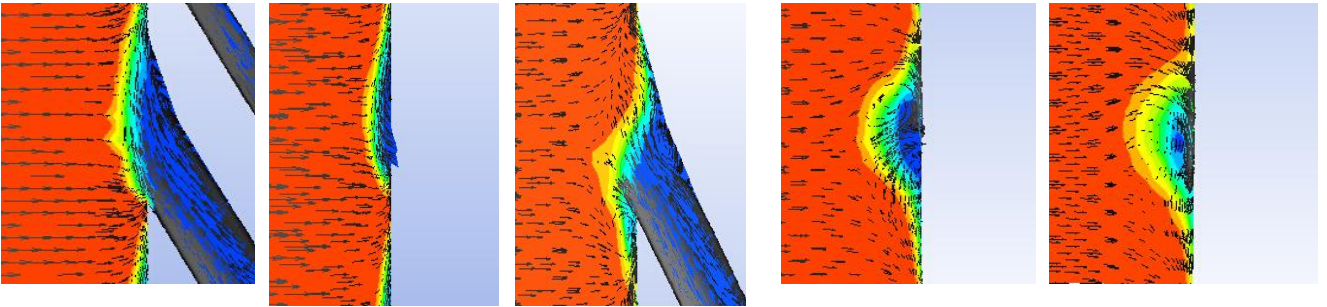
Рис. 7. Ефективність плівкового охолодження інноваційних систем на циліндричній ділянці вхідної кромки (а) і плоскій ділянці за нею (б)

Для віялових отворів, так само як і для циліндричних, охолоджувач не покриває всю поверхню, причому, якщо для циліндричних отворів на ділянці від центральної лінії до бокового ряду отворів умови охолодження досить прийнятні, то для віялових отворів нерівномірність охолодження істотна. Для ділянки за боковим рядом отворів віялові отвори є більш ефективними, ніж циліндричні.

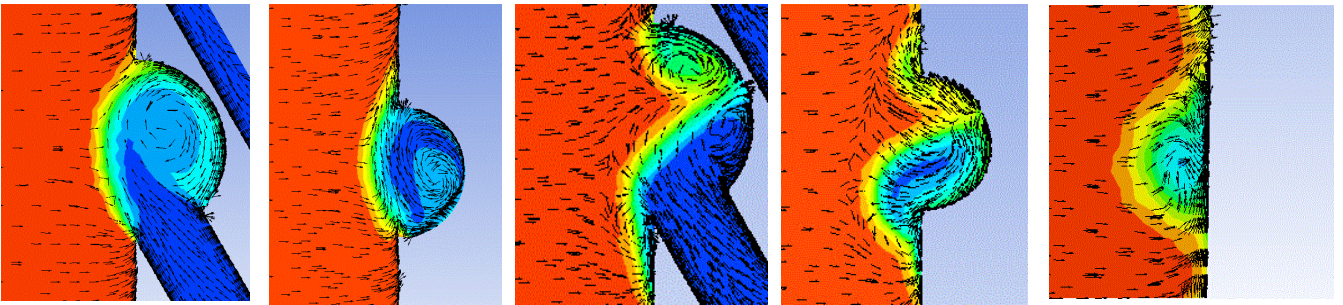
Базовий варіант



Віялові отвори



Отвори в напівсферичних поглибленнях



Отвори в траншеях

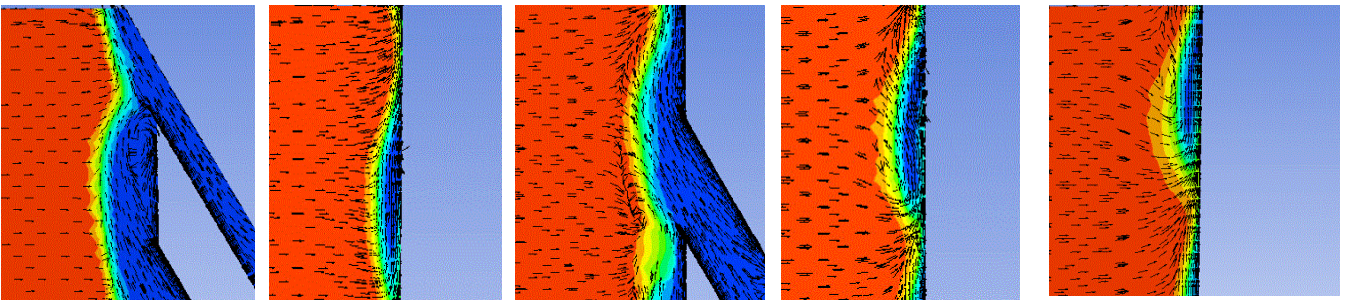
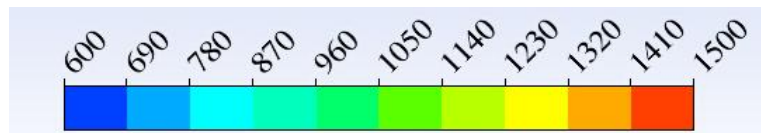
 $x/d = 0$ $x/d = 0,87$ $x/d = 2,62$ $x/d = 3,49$ $x/d = 5,23$ 

Рис. 8. Температурне поле і вихрова структура течії в поперечних перерізах

У напівсферичних поглибленнях має місце інтенсивне вихроутворення. У зону вихору підсмоктується основний потік та сприяє швидкому розмиванню захисної плівки. Те ж явище має місце і в поглибленнях ряду бокових отворів. Причому, нерівномірність потоку по висоті моделі має місце навіть на віддаленні від місця вдуву ($x/d = 5,23$).

Підвищення ефективності плівкового охолодження для випадку отворів у траншеї відбувається завдяки більш рівномірному розтіканню охолоджувача по поверхні траншеї і далі – по поверхні охолодження. Так, наприклад, на відміну від отворів у напівсферичних поглибленнях за боковим рядом отворів у траншеї, при $x/d = 5,23$ охолоджувач досить рівномірно розподілений по поверхні. Подібний розподіл спостерігається для всіх параметрів вдуву.

Вплив умов міжлопаткового каналу. Вище були розглянуто результати, отримані для типової моделі, що складається з циліндричної поверхні з плоскими стінками за нею. В реальних умовах профіль лопатки містить опуклу (спинку) і увігнуту (корито) стінки змінної поздовжньої кривизни в умовах решітки профілів міжлопаткового каналу з істотною конфузорністю, що приводить до появи градієнтів швидкості і тиску.

У зв'язку з цим, з метою перевірки можливості використання залежностей для плівкового охолодження, отриманих на моделях з плоскими стінками, для умов, відповідних міжлопатковому каналу, в роботі виконано додаткові розрахунки. В якості базової моделі для порівняння використана система радіальних отворів з $\alpha = 30^\circ$.

За результатами розрахунків для моделі лопатки (рис. 9) отримано значний перерозподіл ефективності плівкового охолодження між поверхнями корита і спинки лопатки. При значенні параметра вдуву $m = 0,5$ (рис. 9 а) на моделі лопатки повітря з центрального ряду отворів на охолодження не надходить, і навіть має місце затікання основного потоку в порожнину лопатки. Ефективність плівкового охолодження на ділянці вхідної кромки до перерізу $x/d = 2,62$ з боку спинки і корита близька до нуля.

На моделі з плоскими стінками витрата повітря через центральний ряд отворів також близька до нуля, а ефективність плівкового охолодження на ділянці $x/d \leq 2,62$ становить 0...0,27. Відразу за боковими рядами отворів значення ефективності плівкового охолодження для моделі лопатки по спинці і кориту близькі між собою і досягають 0,28. На віддаленні від вхідної кромки при $x/d > 10$ осереднена ефективність плівкового охолодження на спинці істотно вища, ніж на плоскій поверхні, а на кориті – нижча.

При $m = 1,0$ (рис. 9 б) загальний характер поведінки ефективності плівкового охолодження істотно відрізняється від даних, отриманих для моделі з плоскими стінками. У моделі лопатки повітря з центрального ряду отворів забезпечує плівкове охолодження тільки спинки. З боку корита перед боковим рядом отворів ефективність плівкового охолодження близька до нуля. Відзначається суттєва різниця між даними по ефективності плівкового охолодження для корита і спинки. При $m = 1,0$ величина ефективності плівкового охолодження на спинці лопатки вище, ніж при $m = 0,5$, а на кориті зберігається приблизно на тому ж рівні.

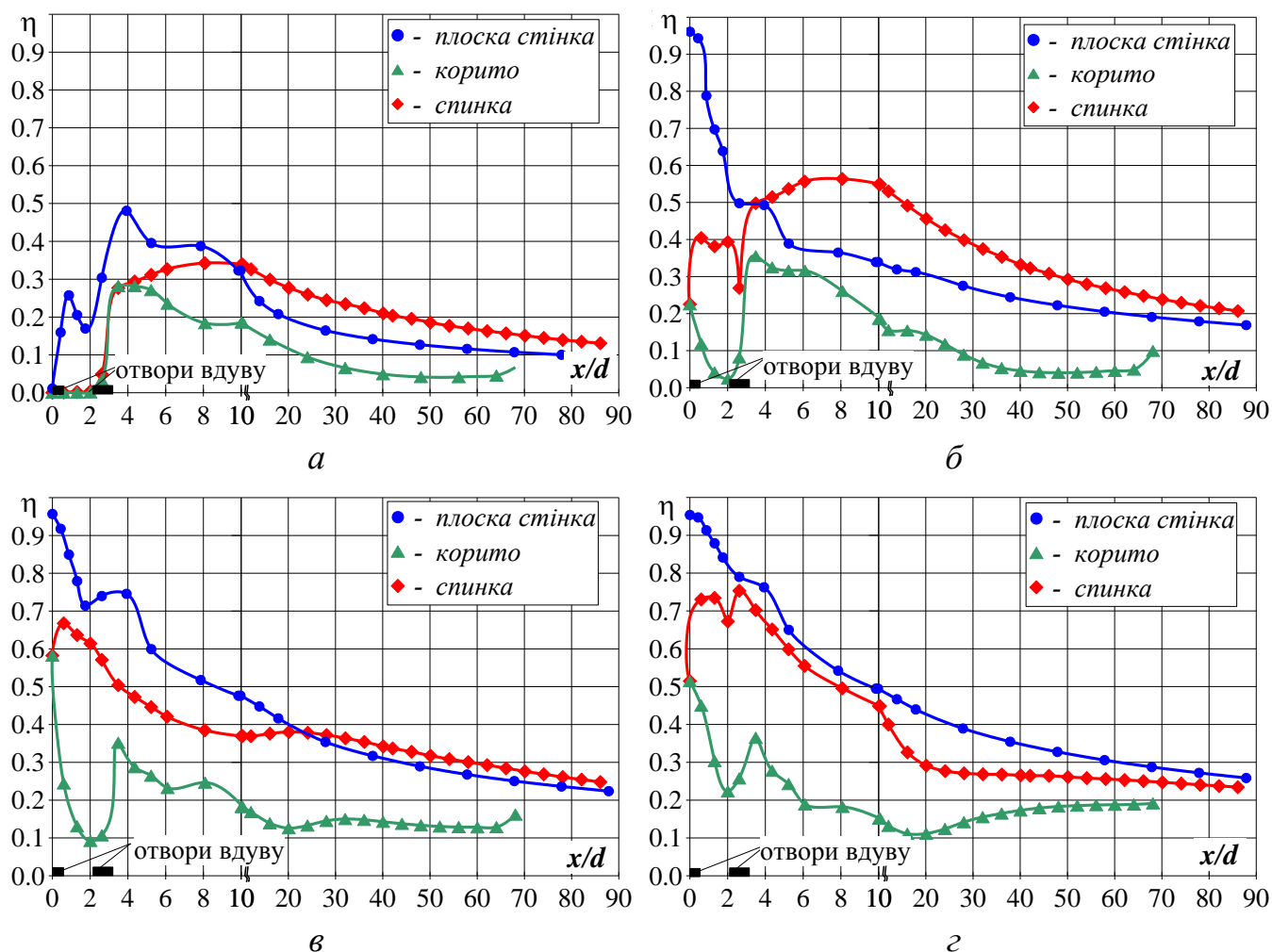


Рис. 9. Ефективності плівкового охолодження по профілю лопатки в порівнянні з моделлю циліндричної вхідної кромки з плоскими стінками за нею:
 $m = 0,5$ (а); $m = 1,0$ (б); $m = 1,5$ (в); $m = 2,0$ (г)

При $m = 1,5$ (рис. 9 в) значення ефективності плівкового охолодження на спинці істотно вище, ніж на кориті. В області $x/d < 25$ значення для моделі з плоскими стінками вище значень на спинці лопатки, а при $x/d > 25$ незначно нижче них.

При $m = 2,0$ (рис. 9 г) ефективність плівкового охолодження для спинки нижче, ніж для моделі з плоскими стінками у всьому досліджуваному діапазоні параметра вдуву. При цьому різниця між ефективністю плівкового охолодження спинки і корита скорочується.

Як видно з рис. 10 а, при всіх значеннях параметра вдуву осереднена ефективність плівкового охолодження на ділянці вхідної кромки лопатки в 1,6...2,3 рази нижче, ніж на вхідній кромці моделі з плоскими стінками. На ділянці $x/d > 7,85$ середня ефективність плівкового охолодження на кориті в 1,7...2,5 рази нижче, ніж на плоскій стінці. У той же час, середня ефективність плівкового охолодження на ділянці спинки при $m \leq 1,5$ вища, ніж на плоскій стінці (при $m = 1,0$ в 1,5 рази), а при більш високих значеннях m – незначно нижче.

Для всіх значень параметра вдуву ефективність плівкового охолодження на ділянці спинки значно вища, ніж на ділянці корита. При $m = 1,0$ середня величина ефективності плівкового охолодження на спинці лопатки більш ніж в три рази перевищує середню величину ефективності на кориті.

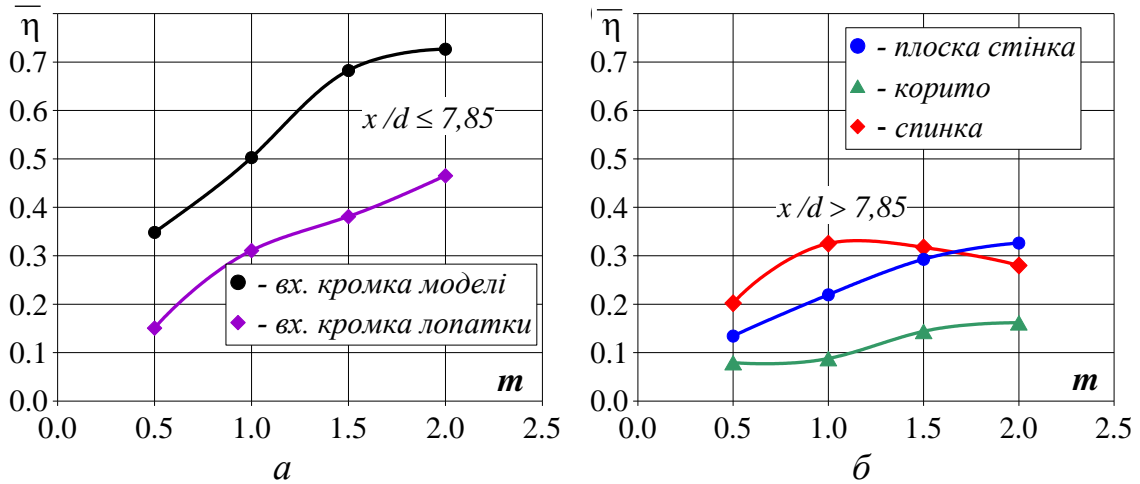


Рис. 10. Порівняння середньої ефективності плівкового охолодження для двох досліджених моделей: ділянка вхідної кромки (а); ділянка за вхідною кромкою (б)

Для аналізу причин зазначених змін на рис. 11 наведено розподіл відносного тиску по профілю лопатки. Для ряду отворів по кориту тиск на виході перевищує відповідне значення для ряду отворів спинки. У той же час тиск на виході з ряду отворів спинки незначно відрізняється від тиску на виході з бокових рядів отворів моделі з плоскими стінками.

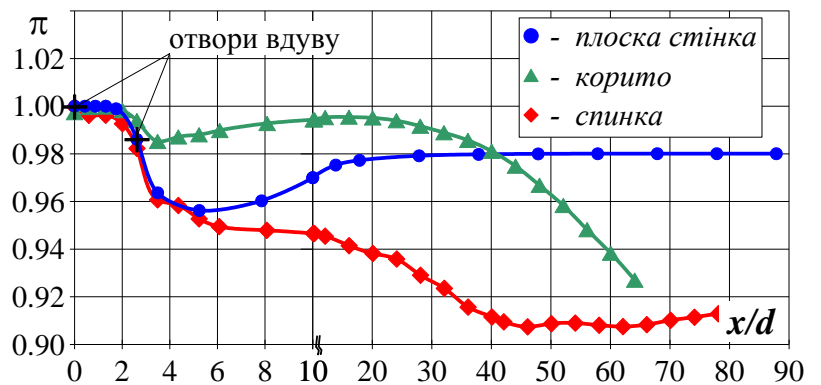


Рис. 11. Розподіл відносного тиску по профілю лопатки

Такий перерозподіл тиску на виході між рядами отворів приводить до відповідного перерозподілу витрат охолоджувача і ефективності охолодження при незмінній величині сумарної витрати охолоджувача.

У таблиці 2 наведено дані з локальних параметрів вдуву (m_i), визначених за витратами повітря через кожен ряд отворів, для двох розглянутих моделей, в залежності від загального параметра вдуву m . Для центральних рядів отворів для обох моделей значення локального параметра вдуву близькі між собою в усьому діапазоні параметра вдуву. Величина m_i для ряду отворів з боку корита в діапазоні $0,5 < m < 2,0$ в 1,03...1,50 рази нижча, ніж для бокового ряду отворів на моделі з плоскими стінками. Для ряду отворів спинки, навпаки, значення m_i в 1,07...1,53 рази вище, ніж для плоскої стінки. Максимальна різниця цих величин відповідає параметру вдуву $m = 0,5$.

Значні відмінності у величині ефективності плівкового охолодження на спинці і кориті лопатки, особливо при $m > 1$, не можуть бути пояснені тільки перерозподілом охолоджувача між рядами отворів, і зумовлені також впливом кривизни поверхні, градієнтами швидкості і тиску на поверхнях лопатки.

Значення локальних параметрів вдуву

m	Вхідна кромка лопатки			Вхідна кромка моделі	
	Центральний ряд	Ряд на спинці	Ряд на кориті	Центральний ряд	Боковий ряд
0,5	-0,07	1,09	0,47	0,08	0,71
1,0	0,73	1,38	0,90	0,80	1,10
1,5	1,28	1,78	1,45	1,34	1,57
2,0	1,79	2,22	1,99	1,87	2,06

Таким чином, виконане дослідження показує, що використання залежностей, отриманих на моделі з плоскими стінками, для розрахунку реальної лопатки можливо тільки з поправками, які можуть бути визначені за даними, представленим у цій роботі.

ВИСНОВКИ

Виконано дослідження різних систем плівкового охолодження вхідної кромки лопатки при подачі охолоджувача в трирядну систему радіальних циліндричних, паралельних і віялових отворів, а також отворів, розташованих в напівсферичних поглибленнях і в траншеях. Дослідження виконано в діапазоні зміни параметра вдуву від 0,5 до 2,0 на моделі циліндричної вхідної кромки з плоскими стінками за нею, а також на моделі реальної лопатки. Отримано нові наукові дані, що характеризують ефективність плівкового охолодження, сформульовано рекомендації щодо вдосконалення сучасних і інноваційних систем плівкового охолодження вхідних кромок лопаток газових турбін.

Основні наукові результати полягають у наступному:

1. Показано, що при подачі охолоджувача через систему радіальних циліндричних отворів моделі циліндричної вхідної кромки з плоскими стінками за нею найбільш ефективним з точки зору охолодження є розташування ряду бокових отворів під кутом $\alpha = 15^\circ$ від центральної лінії, для якого при $m = 0,5$ ефективність плівкового охолодження становить 0,48, при $m = 1,0$ – 0,52, а при $m = 2,0$ – 0,84.

2. Система паралельних отворів на моделі циліндричної вхідної кромки з плоскими стінками за нею показала кращі результати з точки зору ефективності плівкового охолодження, ніж система радіальних циліндричних отворів з кутом $\alpha = 30^\circ$. Винятком є значення параметра вдуву $m = 0,5$, де ефективність плівкового охолодження вхідної кромки близька до ефективності для системи радіальних отворів.

3. При подачі охолоджувача в поверхневі поглиблення на моделі циліндричної вхідної кромки з плоскими стінками за нею найбільш ефективною є система отворів у траншеях. В цьому випадку ефективність плівкового охолодження, осереднена за всіма параметрами вдуву становить, 0,69, що на 23 % вище, ніж для системи радіальних циліндричних отворів.

4. При використанні віялових отворів на моделі циліндричної вхідної кромки осереднена за всіма значеннями параметра вдуву величина ефективності плівкового охолодження становить 0,60, що незначно вище даних для системи радіальних отворів (0,56).

5. Виконання отворів в напівсферичних поглибленнях на моделі циліндричної вхідної кромки з плоскими стінками за нею не приводить до підвищення ефективності плівкового охолодження, осереднене значення за всіма параметрами вдуву становить 0,55, що близько до даних для системи радіальних отворів.

6. Для системи радіальних отворів вперше показано, що наявність факторів, що мають місце в реальному міжлопатковому каналі (змінна кривизна поверхні, градієнти швидкості і тиску), приводить до істотного перерозподілу охолоджувача між рядами отворів і ефективності плівкового охолодження в порівнянні з моделлю з плоскими стінками, як на вхідній кромці, так і за нею.

7. Для моделі лопатки, в залежності від величини параметра вдуву, осереднена ефективність плівкового охолодження на ділянці вхідної кромки в 1,6...2,3 рази нижча, ніж на моделі циліндричної вхідної кромки з плоскими стінками за нею. Середня ефективність плівкового охолодження на кориті в 1,7...2,5 рази нижча, ніж на плоскій стінці моделі. На спинці ефективність плівкового охолодження в 2,5...3,6 вища, ніж на кориті лопатки.

8. Для досліджених конфігурацій вперше отримано залежності ефективності плівкового охолодження вхідної кромки моделі з плоскими стінками у порівнянні з реальною лопаткою.

Отримані в роботі результати можуть бути рекомендовані для використання в енергомашинобудуванні, промисловій теплоенергетиці, при створенні високо-температурних конструкцій і апаратів з плівковим охолодженням циліндричної поверхні. Значний інтерес для подальшого дослідження становить вивчення впливу факторів зовнішньої турбулентності основного потоку і обертання охолоджуваної поверхні.

Позначення: α – кут відхилення ряду бокових отворів від центральної лінії, [°]; β – кут нахилу отворів в поперечному напрямку, [°]; γ – кут розширення віялової частини отворів в боковому напрямку, [°]; d – діаметр отвору вдуву, [м]; D – діаметр напівсферичних поглиблень, [м]; h – глибина траншеї, [м]; $m = (\rho_{ox} C_{ox}) / (\rho_g C_g)$ – параметр вдуву; $\eta = (T_g - T_{ct}) / (T_g - T_{ox})$ – ефективність плівкового охолодження; $\bar{\eta}$ – ефективність плівкового охолодження, осереднена по поверхні; C – швидкість потоку, [м/с]; P – тиск, [Па]; T – температура, [°С]; s – ширина траншеї, [м]; t – крок розташування отворів в поперечному напрямку, [м]; x – поздовжня координата, [м].

Індекси: CT – адіабатна стінка; OTB – параметри отворів плівкового охолодження; OX – параметри потоку, що вдувається (охолоджувача); G – параметри основного потоку (газу).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті:

1. Халатов А.А. Перспективные системы охлаждения лопаток газовых турбин вихревого типа / А.А. Халатов, Ю.Я. Дашевский, Д.Н. Письменный, В.Ю. Петельчиц // Насосы. Турбины. Системы. – 2013. – № 2 (7). – С. 28-37. (Видання Російської Федерації, РИИЦ).

Здобувачем виконано аналіз систем охолодження лопаток сучасних ГТД.

2. Петельчиц В.Ю. Адаптация SST модели турбулентности для моделирования пленочного охлаждения плоской пластины / В.Ю. Петельчиц, А.А. Халатов, Д.Н. Письменный, Ю.Я. Дашевский // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 3/12 (63). – С. 25–29. (*Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus*)

Здобувачем виконано адаптацію моделі турбулентності для моделювання плівкового охолодження плоскої стінки.

3. Петельчиц В.Ю. К вопросу повышения точности RANS моделирования пленочного охлаждения / В.Ю. Петельчиц, А.А. Халатов, Д.Н. Письменный, Ю.Я. Дашевский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 8 (105). – С. 116-122. (*Спеціалізоване видання України, Index Copernicus, Scholar, Ulrich's Periodicals Directory*).

Здобувачем виконано тестові розрахунки для визначення моделі турбулентності та параметрів комп'ютерної моделі.

4. Петельчиц В.Ю. CFD-моделирование пленочного охлаждения пластины с входным цилиндрическим участком / В.Ю. Петельчиц // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2014. – № 11 (1054). – С. 82-89. (*Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Index Copernicus*).

5. Петельчиц В.Ю. Влияние ориентации рядов отверстий на цилиндрическом участке входной кромки на эффективность пленочного охлаждения / В.Ю. Петельчиц, Д.Н. Письменный, Ю.Я. Дашевский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2015. – № 15 (1124). – С. 69-75. (*Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Index Copernicus*).

Здобувачем виконано розробку комп'ютерної моделі, проведено розрахунки та виконано обробку та аналіз отриманих даних.

6. Петельчиц В.Ю. Оценка влияния кривизны поверхности на эффективность пленочного охлаждения / В.Ю. Петельчиц, Д.Н. Письменный, Ю.Я. Дашевский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2016. – № 9 (1181). – С. 69-75. (*Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Index Copernicus*).

Здобувачем виконано дослідні розрахунки, обробку та аналіз результатів.

Тези:

1. Петельчиц В.Ю. Верификация CFD-модели температурного состояния рабочей лопатки по результатам теплогидравлических испытаний / В.Ю. Петельчиц, Д.Н. Письменный, Ю.Я. Дашевский // Сучасний стан та проблеми двигунобудування: Матеріали II міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: Національний університет кораблебудування 2012.– С. 238 – 240.

2. Петельчиц В.Ю. Локальное изменение турбулентного числа Прандтля для моделирования пленочного охлаждения / В.Ю. Петельчиц, Д.Н. Письменный, Ю.Я. Дашевский // Суднова енергетика: стан та проблеми: Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, науковців та фахівців. – Миколаїв: Національний університет кораблебудування. – 2013.– С. 155-157.

3. Петельчиц В.Ю. Моделирование тракта подвода охлаждающего воздуха к рабочим лопаткам ГТД / В.Ю. Петельчиц, Д.Н. Письменный, Ю.Я. Дашевский // Сучасний стан та проблеми двигунобудування: Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: Національний університет кораблебудування 2014.– С. 208 – 211.

4. Петельчиц В.Ю. Способы повышения эффективности пленочного охлаждения входных кромок лопаток ГТД // В.Ю. Петельчиц, Д.Н. Письменный, Ю.Я. Дашевский // Суднова енергетика: стан та проблеми: Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, науковців та фахівців. – Миколаїв: Національний університет кораблебудування. – 2015.– С. 90-93.

5. Петельчиц В.Ю. Исследование схем размещения отверстий пленочного охлаждения на входной кромке лопатки ГТД // В.Ю. Петельчиц, Д.Н. Письменный, Ю.Я. Дашевский // Суднова енергетика: стан та проблеми: Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, науковців та фахівців. – Миколаїв: Національний університет кораблебудування. – 2015.– С. 93-96.

АНОТАЦІЯ

Петельчиц В.Ю. Вдосконалення систем плівкового охолодження вхідних кромок лопаток газових турбін. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2016.

Дисертація присвячена дослідженню плівкового охолодження вхідних кромок лопаток турбін газотурбінних двигунів при подачі охолоджувача в трирядну систему радіальних та паралельних циліндричних отворів. Крім того, розглянуто варіанти трирядної системи з віяловими отворами, а також отворами,

розташованими у напівсферичних поглибленнях і траншеях. У всіх розглянутих випадках діаметр отворів $d = 0,5$ мм, відносний крок отворів в поперечному напрямку $t/d = 4$; кут нахилу отворів до охолоджуваної поверхні $\beta = 30^\circ$; відношення діаметра отворів до діаметру вхідної кромки 0,1. Усі ці значення є характерними для вхідних кромки лопаток турбін.

Дослідження виконано для діапазону параметра вдуву від 0,5 до 2,0 на моделі з циліндричною вхідною кромкою і плоскими стінками за нею, а також на моделі лопатки в умовах реального профілю лопатки.

Для дослідження було використано метод математичного моделювання, усі розрахунки виконано у програмному комплексі ANSYS CFX 14.5. Перед виконанням досліджень був виконаний ряд тестових розрахунків, результати яких порівнювались з експериментальними даними, наведеними у відповідних публікаціях. Результати тестових розрахунків показали, що найкращий збіг з експериментальними даними забезпечує *SST* модель турбулентності, яка потім була використана у всіх розрахунках даної роботи.

Розглянуто три варіанти радіальних систем плівкового охолодження з різними кутами відхилення ряду бокових отворів від центральної лінії ($\alpha = 15^\circ$, 30° і 45°), визначено його вплив на ефективність плівкового охолодження вхідної кромки і плоскої стінки за нею. Визначено, що для системи з радіальним розміщенням отворів, найбільша ефективність забезпечується в схемі з $\alpha = 15^\circ$. При $\alpha = 45^\circ$ та $m = 0,5$ спостерігається різке зниження ефективності плівкового охолодження, тому що охолоджувач витікає на поверхню вхідної кромки лише через боковий ряд отворів, в той час як в центральний ряд отворів затікає основний потік (газ). Було встановлено, що система паралельних отворів більш ефективна порівнюючі з системою радіальних отворів.

Виконані дослідження ефективності плівкового охолодження при використанні на вхідній кромці віялових отворів, отворів в напівсферичних поглибленнях, а також отворів, заглиблених у траншеях, показали, що, на відміну від плоскої пластини, підвищення ефективності плівкового охолодження досягнуто тільки для системи отворів у траншеях.

У даній роботі вивчено структуру потоків, досліджено вплив кривизни поверхні, градієнтів швидкості та статичного тиску в умовах міжлопаткового каналу на розподіл ефективності плівкового охолодження для радіальної системи отворів. Встановлено, що ці фактори призводять до істотного перерозподілу витрати охолоджувача між рядами отворів і, як результат, до зміни розподілу ефективності плівкового охолодження в порівнянні з моделлю з плоскими стінками за вхідною кромкою.

Ключові слова: плівкове охолодження, ефективність плівкового охолодження, віялові отвори, напівсферичні поглиблення, траншея.

АННОТАЦИЯ

Петельчиц В.Ю. Совершенствование систем пленочного охлаждения входных кромок лопаток газовых турбин. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена исследованию пленочного охлаждения входных кромок лопаток турбин газотурбинных двигателей при подаче охладителя в трехрядную систему радиальных и параллельных цилиндрических отверстий. Кроме того, рассмотрены варианты трехрядной системы с веерными отверстиями и отверстиями, расположенными в полусферических углублениях и траншеях. Во всех рассмотренных случаях диаметр отверстий составлял $d = 0,5$ мм, относительный шаг отверстий по высоте $t/d = 4$; угол наклона отверстий к охлаждаемой поверхности $\beta = 30^\circ$; отношение диаметра отверстий к диаметру входной кромки 0,1. Все эти значения характерны для входных кромок лопаток турбин.

Исследования были выполнены для диапазона параметра вдува от 0,5 до 2,0 на модели с цилиндрической входной кромкой и плоскими стенками за ней, а также на модели реального профиля лопатки.

Для исследования использован метод численного моделирования, все расчеты выполнены в программном комплексе ANSYS CFX 14.5. Перед выполнением исследований был выполнен ряд тестовых расчетов, результаты которых сравнивались с экспериментальными данными, представленными в соответствующих публикациях. Результаты тестовых расчетов показали, что наилучшее совпадение с результатами экспериментов обеспечивает SST модель турбулентности, использованная затем во всех вычислениях данной работы.

Рассмотрены три варианта радиальных систем пленочного охлаждения с различными углами отклонения рядов боковых отверстий от центральной линии ($\alpha = 15, 30$ и 45°), определено влияние этого угла на эффективность пленочного охлаждения входной кромки и плоской стенки за ней. Определено, что для радиальной системы наибольшая эффективность обеспечивается в схеме с $\alpha = 15^\circ$. При $\alpha = 45^\circ$ и $m = 0,5$ наблюдается резкое снижение эффективности пленочного охлаждения, т.к. охладитель вытекает на поверхность входной кромки только через боковой ряд отверстий, в то время как в центральный ряд отверстий затекает основной поток (газ). Было установлено, что система параллельных отверстий более эффективна по сравнению с системой радиальных отверстий.

Выполненные исследования эффективности пленочного охлаждения при использовании на входной кромке веерных отверстий, отверстий в полусферических углублениях, а также отверстий, углубленных в траншеях, показали, что, в отличие от плоской пластины, повышение эффективности пленочного охлаждения достигнуто лишь в системе отверстий в траншеях.

В данной работе изучена структура потоков, влияние кривизны стенки, градиентов скорости и статического давления в условиях межлопаточного канала

на распределение эффективности пленочного охлаждения для радиальной системы. Установлено, что эти факторы приводят к существенному перераспределению расхода охладителя между рядами отверстий и, в результате, изменению распределения эффективности пленочного охлаждения по сравнению с моделью с плоскими стенками за входной кромкой.

Ключевые слова: пленочное охлаждение, эффективность пленочного охлаждения, веерные отверстия, полусферические углубления, траншея.

ABSTRACT

Petelchyts V.Y. Development of film cooling systems of gas turbine blade leading edge. – As a manuscript.

The thesis is submitted for technical sciences candidate degree on the specialty 05.14.06 – Engineering Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering. – Institute for Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine. – Kyiv, 2016.

The thesis is aimed at the study of gas turbine blade leading edge film cooling, formed by coolant supply through three-row cylindrical hole systems, with radially arranged and with parallel to each other hole rows. Besides, there were studied three-row variants with fan-shaped holes, and holes, located in hemispherical dimples and embedded in trenches. In all these cases the hole diameter was $d = 0.5$ mm, hole-to-hole normal spacing in the span-wise direction was $t/d = 4$; hole inclination angle to the cooling surface was $\beta = 30^\circ$; the ratio of the holes diameter to the leading edge diameter was 0.1. All these values are representative for the turbine blade leading edge.

The study was performed for the blowing ratios range from 0.5 to 2.0 at the model of cylindrical leading edge with following flat walls and at the blade airfoil model as well.

For the study numerical simulation method was used, all the calculations were performed with the use of commercial software code ANSYS CFX 14.5. Before the study, a series of test calculations were carried out; results of these calculations were compared with experimental data from appropriate papers. Test calculations results showed, that the best coincidence with the experimental data provides SST turbulence model, used for all the calculations in the study.

Three variants of radial hole row systems with different row angles to the stagnation line ($\alpha = 15^\circ, 30^\circ$ and 45°) were considered; the influence of this angle on the film cooling efficiency for the leading edge and following flat wall was determined. It was found, that for the radial hole row systems, the highest film cooling effectiveness provides the scheme with $\alpha = 15^\circ$. At $\alpha = 45^\circ$ and $m = 0,5$ film cooling effectiveness decreases significantly because coolant flows out on the leading edge surface only through side hole rows, while the main stream (gas) flows into the central row of holes. It was revealed, that the system of three parallel hole rows was more efficient in comparison with radial hole row systems.

Investigations on film cooling effectiveness in cases with fan-shaped holes, holes in hemispherical dimples and holes, embedded in trenches on the leading edge, showed,

that in contrast to the flat plate, film cooling efficiency augmentation was obtained only for system of holes embedded in trenches.

In this work flow patterns, the effect of wall curvature, velocity and static pressure gradients in inter blade passage conditions on film cooling effectiveness distribution for the radial row systems were also studied. It was determined that these factors lead to significant redistribution of coolant flow between rows of holes and, as a result, to film cooling efficiency distribution changes in comparison with the model with flat walls, subsequent to the leading edge.

Keywords: film cooling, film cooling effectiveness, fan-shaped holes, hemispherical dimples, trenches.