НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

ПАНЧЕНКО НАДІЯ АНАТОЛІЇВНА

УДК 536.244:621.438

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПЛОСКОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ПОДАЧІ ОХОЛОДЖУВАЧА ЧЕРЕЗ ПАРНІ ОТВОРИ

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 Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» МОН України на кафедрі фізики енергетичних систем і 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,
зав. відділу високотемпературної термогазодинаміки,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут» МОН України,
зав. кафедри фізики енергетичних систем

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

доктор технічних наук, професор,
Мочалін Євген Валентинович,
Національний авіаційний університет МОН України, професор кафедри гідрогазових систем

Захист відбудеться «22» березня 2016 р. о $10^{\underline{00}}$ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 в Інституті технічної теплофізики НАН України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Желябова, 2-А.

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

Автореферат розісланий «17» лютого 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук О.І. Чайка

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Газові турбіни широко використовуються в енергетиці, цивільній та військовій авіації, суднобудуванні, а також в якості приводу компресорів на магістральних газопроводах газотранспортних систем. Вони є одним з найбільш ефективних типів теплових машин і продовжують динамічно розвиватися. Україна має добре розвинену інфраструктуру енергетичного, суднового та авіаційного газотурбобудування і входить в десятку країн світу, що володіють повним циклом проектування і серійного виробництва газових турбін потужністю до 100 МВт.

Досягнення високої економічності ГТД і ГТУ пов'язано, в першу чергу, із зростанням температури газу перед турбіною, яка сьогодні складає 1500…1600^{o}С в потужних енергетичних ГТУ та 1750…1800^{o}С – в авіаційних ГТД військового призначення. В українських ГТД наземного і морського використання надійно освоєна температура на рівні 1300…1350^{o}С.

На сучасному технічному рівні можливість підвищення температури газу на вході в турбіну 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 повітряне охолодження. Для зовнішнього охолодження, поряд з теплоізоляційними (жаростійкими) тонкостінними покриттями, широко використовується плівкове (завісне) охолодження, коли охолоджувач подається з внутрішньої порожнини лопатки на охолоджувану поверхню через щілину або систему дискретних отворів діаметром 0,5…0,8 мм. Згідно з опублікованими даними, плівкове охолодження збереже свою конкурентоспроможність у газових турбінах до температури газу 1800…1850°С.

Починаючи з 50-х років, у світі виконано великий обсяг теоретичних і експериментальних досліджень, що дозволяє надійно виконувати розрахунки різних схем плівкового охолодження, таких як тангенційна і суцільна щілина, пористий і аблюючий пояски, за пояском перфорації (ряди похилих циліндричних отворів) і охолодження потоку за ділянкою теплообміну.

У колишньому СРСР основні роботи по дослідженню плівкового охолодження було виконано в Інституті теплофізики СВ РАН (Кутателадзе С.С., Леонтьєв О.І., Волчков Є.П., Терєхов В.І.), Московському державному технічному університеті ім. М.Е. Баумана (Єпіфанов В.М. та ін.), а також у низці закритих організацій (ЦІАМ, НДІТП, ЦАГІ та ін.). В Україні дослідження плівкового охолодження проводилися в Інституті технічної теплофізики НАНУ (Дибан Є.П., Репухов В.М., Халатов А.А.), Київському ВВАІУ, НТУ ХПІ, ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» (Миколаїв), ДП «Івченко-Прогрес» (Запоріжжя). За кордоном активні дослідження виконані Гольдштейном Р.Дж., Дітмаром Дж. , Себаном Р.А., Богардом Д.Дж., Еккертом Є.Р., Банкером Р.С., Ліграні П.М. (США), Відхардом К., Балдауфом С., Шульцом А. (Німеччина). Результати цих досліджень дозволили отримати узагальнюючі рівняння, розробити надійні методики та програми розрахунку, використані при створенні серії високотемпературних ГТД і ГТУ різного призначення.

При температурі газу вище 1400ºС витрати повітря на охолодження лопаток при конвективно-плівковому охолодженні можуть становити 15% і більше від витрати повітря через компресор, тому при подальшому підвищенні температури необхідні витрати охолоджувача зростають настільки, що термодинамічні втрати при змішуванні основного потоку з охолоджувачем можуть перевищити позитивний ефект, досягнутий за рахунок охолодження.

У зв'язку з цим великий практичний інтерес становить пошук альтернативних схем плівкового охолодження, що мають прийнятні з точки зору термодинамічної ефективності витрати охолоджувача, високу теплофізичну ефективність та характеризуються відносно нескладною технологією виготовлення. В даний час ці питання активно вивчаються вченими і конструкторами провідних світових виробників газотурбінної техніки. Досліджуються наступні конфігурації: профільовані отвори – віялові (fan-shaped), консольні, у вигляді гантелі, бобу, півмісяця; отвори, вихід з яких розміщено у заглибленнях (напівсферичних, кратерах, траншеях), схема парних отворів (double-jet).

Отримані на даний час результати показують, що при тій же витраті охолоджувача схеми охолодження з отворами складного профілю дозволяють збільшити ефективність охолодження в 2 і більше разів в порівнянні з традиційними системами похилих циліндричних отворів в охолоджуваній стінці при тих же витратах охолоджувача. Однак виконання таких отворів, що мають розміри менше одного міліметра, вимагає вартісного технологічного обладнання та пов'язане з великими фінансовими витратами.

Таким чином, подальше дослідження перспективних схем і фізичного механізму плівкового охолодження, вивчення фізичного механізму та отримання узагальнюючих залежностей в широкому діапазоні зміни визначальних факторів має *актуальне наукове і практичне значення* для газотурбобудування. Особливо актуальним є пошук альтернативних схем з високою теплофізичною ефективністю, прийнятними з точки зору термодинамічних втрат витратами охолоджувача і більш простою технологією виготовлення. У роботі зроблено висновок, що до таких конфігурацій відноситься схема парних отворів, що формує антиниркову вихрову структуру (рис.3). Важливим напрямком є також подальше вивчення можливостей комп'ютерного моделювання плівкового охолодження, в тому числі, визначення адекватних моделей турбулентності.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано на кафедрі фізики енергетичних систем НТУУ «КПІ» згідно з тематичними напрямками наукових досліджень і науково-технічних розробок, а саме держбюджетної НДР № 2610-ф «Теплові і газодинамічні процеси в складних вихрових і закручених потоках» (НТУУ «КПІ», № д/р 0113U002467) та в ІТТФ НАНУ у відділі високотемпературної термогазодинаміки згідно з держбюджетною 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); науково-технічної роботи за Договором №310/2056 «Порівняльні дослідження осцилюючого та інших перспективних схем плівкового охолодження поверхонь» (ІТТФ НАНУ та Державне підприємство «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект»);

наукової роботи за Договором №01-08-14 «Експериментальне і числове дослідження перспективних систем плівкового охолодження високотемпературних енергетичних установок» (спільний проект програми НАН України і РФФД, № д/р 0114U004037).

Мета і задачі дослідження. *Мета даної роботи* — дослідження фізичних закономірностей і визначення розрахункових залежностей, що характеризують ефективність плівкового охолодження при подачі охолоджувача через парні отвори, розташовані на вході в пластину з урахуванням впливу параметра вдуву, прискорення і зовнішньої турбулентності потоку.

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

— Створити робочу ділянку і виконати експериментальні дослідження ефективності плівкового охолодження плоскої поверхні з подачею охолоджувача через систему парних отворів на вході в діапазоні зміни параметра вдуву від 0,5 до 3,0. Отримати базову залежність для безградієнтної течії при відсутності зовнішньої турбулентності та прискорення потоку.

— Вивчити вплив зовнішньої турбулентності і від'ємного градієнта тиску при різних законах прискорення потоку, і отримати залежності, які характеризують вплив цих факторів на ефективність плівкового охолодження.

— Для заданих значень кутів β_1 і β_2 визначити ступінь поперечної нерівномірності ефективності плівкового охолодження для безградієнтної і градієнтної течій, а також в умовах зовнішньої турбулентності.

— Визначити математичні моделі турбулентності, що адекватно описують ефективність плівкового охолодження, вивчити фізичну структуру потоку за парними отворами, виявити фактори, що характеризують фізичний механізм плівкового охолодження.

— Вивчити вплив поперечної відстані Δ між отворами першого і другого ряду при заданих значеннях кутів β_1 і β_2 на ефективність плівкового охолодження і визначити її значення, що забезпечує максимальну ефективність плівкового охолодження.

Об’єкт дослідження — процеси теплообміну та гідродинаміки при плівковому охолодженні плоскої поверхні з подачею охолоджувача через парні отвори на вході в плоску пластину.

Предмет дослідження — закономірності і фактори, що впливають на ефективність плівкового охолодження і фізичну структуру потоку при подачі охолоджувача через парні отвори на вході в плоску пластину.

Методи дослідження. У дисертації використовується поєднання експериментального і теоретичного (комп'ютерне моделювання) методів дослідження. В експериментальній частині вивчається ефективність плівкового охолодження для різних значень параметра вдуву, інтенсивності зовнішньої турбулентності і прискорення потоку, а також фізична структура поверхневих ліній течії. У теоретичній частині з використанням програмного комплексу ANSYS CFX і порівнянням з отриманими в роботі експериментальними даними визначаються математичні моделі турбулентності, які адекватно описують плівкове охолодження в досліджуваних умовах, вивчається фізична структура потоку і визначаються фактори, що характеризують ефективність плівкового охолодження і оптимальне значення поперечної відстані Δ між отворами першого і другого ряду.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються. Обґрунтування достовірності отриманих результатів виконано шляхом проведення тестових випробувань експериментального стенду і системи вимірювань, використання апробованих методик проведення експериментів і методів узагальнення експериментальних даних на основі теорії подібності, аналізу похибки вимірювань, узгодження отриманих результатів з опублікованими в літературі даними. Достовірність комп'ютерного моделювання забезпечена коректним застосуванням програмного комплексу ANSYS CFX, сертифікованого міжнародними стандартами з сертифікатом якості ISO 9001:2008, порівнянням результатів комп'ютерного моделювання та отриманих в роботі експериментальних даних, використанням адекватної моделі турбулентності при аналізі фізичної структури потоку.

Наукова новизна отриманих результатів:

— Вперше на основі експериментального і теоретичного дослідження схеми парних отворів в широкому діапазоні зміни параметра вдуву при зовнішній турбулентності і прискоренні потоку отримані нові наукові дані, що характеризують фізичний механізм і закономірності плівкового охолодження.

— Вперше показано, що при ідентичних умовах середня ефективність плівкового охолодження за парними отворами при малих (m = 0,50) і помірних (m = 1,0) значеннях параметра вдуву на 20-25% вище, ніж для традиційної схеми похилих отворів і відповідає їй при m = 1,5 і більше.

— Вперше отримана узагальнююча (базова) залежність для середньої по ширині ефективності плівкового охолодження за парними отворами в умовах безградієнтного і низькотурбулентного потоку (≈ 1%).

— Вперше показано, що для досліджених умов зовнішня турбулентність (до 7%) має незначний вплив на ефективність плівкового охолодження. Прискорення потоку знижує ефективність плівкового охолодження до 25% (m = 0,5); узагальненням дослідних даних отримана степенева залежність для фактора прискорення.

— Вперше для безградієнтного і низькотурбулентного потоку отримані залежності, що характеризують зміну ступеня нерівномірності ефективності плівкового охолодження по довжині пластини. Показано, що зовнішня турбулентність і прискорення потоку збільшують ступінь поперечної нерівномірності охолодження поверхні.

— На основі порівняння експериментальних і розрахункових даних показано, що при низькому параметрі вдуву (m = 0,5) всі розглянуті в роботі моделі турбулентності (*k-ε*, *RNG k-ε*, *k-ω*, *SST k-ω*, *LLR RSM*, *SSG RSM*) показують задовільне наближення до отриманих в роботі експериментальних даних, при цьому кращі результати демонструє *k-ε* модель. Зі збільшенням параметра вдуву всі моделі показують завищені (до 40%) результати на ділянці $x/d < 10...20$. Це свідчить про достатньо великі похибки комп'ютерного моделювання даної схеми плівкового охолодження при m = 1,0 і більше.

— Вперше на основі комп'ютерного моделювання та поверхневої візуалізації потоку показано, що збільшення ефективності плівкового охолодження при малих і помірних параметрах вдуву обумовлено формуванням антиниркової вихрової

структури з поперечним розтіканням охолоджувача, що перешкоджає надходженню основного потоку до стінки.

— Вперше показано, що при заданих значеннях кутів подачі охолоджувача β_1 і β_2 поперечна відстань Δ між отворами першого і другого ряду значно впливає на ефективність плівкового охолодження, яка змінюється за кривою з максимумом. Вперше отримано рівняння для оптимального значення параметра Δ, що забезпечує максимальну ефективність охолодження.

Практична цінність отриманих результатів. Отримані в дисертаційній роботі результати можуть використовуватися при розрахунках ефективності плівкового охолодження за парними отворами, як при безградієнтній течії, так і в умовах зовнішньої турбулентності і прискорення потоку. При комп'ютерному моделюванні плівкового охолодження з подачею охолоджувача через парні отвори при безградієнтному і низькотурбулентному потоці і малих параметрах вдуву ($m = 0{,}5$) можна рекомендувати використання k-ε моделі турбулентності, яка забезпечує найкраще наближення до експериментальних даних, отриманих в роботі.

Результати, отримані в дисертації, знайшли застосування при розробці методики розрахунку ефективності плівкового охолодження соплових лопаток високотемпературних ГТД для ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» (спільно з Інститутом технічної теплофізики НАНУ, акт використання від 16.01.2015 р., акт впровадження від 15.11.2013 р.), а також у навчальному процесі при підготовці студентів Фізико-технічного інституту НТУУ «КПІ» за напрямом «Прикладна фізика» (спеціалізація «Фізика енергетичних систем і нових джерел енергії», акт використання від 27.01.2015 р.).

Особистий внесок здобувача. Здобувачем створено та змонтовано робочу ділянку для дослідження ефективності плівкового охолодження плоскої пластини при подачі охолоджувача через парні отвори, обґрунтовані її геометричні розміри, створені ділянки турбулентності і прискорення потоку. Проведено експериментальне дослідження структури поверхневих ліній течії, ефективності плівкового охолодження, виконано аналіз отриманих результатів, отримано узагальнюючі залежності, зроблено порівняння отриманих результатів з традиційною та перспективними конфігураціями плівкового охолодження. За допомогою програмного комплексу ANSYS CFX порівнянням з власними експериментальними даними визначені адекватно моделі турбулентності, вивчена вихрова структура при змішуванні основного і вторинного потоків, визначені оптимальна відстань між отворами Δ та фізичні фактори, що характеризують ефективність плівкового охолодження.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні результати роботи обговорювались і отримали схвалення на VIII і IX Міжнародних конференціях «Проблеми промислової теплотехніки» (Київ, 2013 і 2015), X і XI Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми енергозбереження і шляхи їх вирішення» (Харків, 2014 і 2015), XII і XIII Всеукраїнських науково-практичних конференціях студентів, аспірантів і молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики і інформатики» (Київ, НТУУ «КПІ», 2014 і 2015), XIX і XX Міжнародних конгресах двигунобудівників (смт Коблево, 2014 і 2015), LXI Науково-технічній сесії РАН з проблем газових турбін і парогазових установок

«Наукові та практичні проблеми використання досягнень авіадвигунобудівництва в наземних ГТУ» (Перм, Росія, 2014), Всеросійській школі-конференції молодих вчених з міжнародною участю «Актуальні питання теплофізики і фізичної гідрогазодинаміки» (Новосибірськ, Росія, 2014), Шостій Російській національній конференції по теплообміну (РНКТ-6) (Москва, Росія, 2014), XIII Міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (Київ, 2015), XV Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених і студентів "Політ. Сучасні проблеми науки" (Київ, 2015), П'ятій міжнародній конференції «Тепломасообмін та гідродинаміка в закручених потоках» (Казань, Росія, 2015).

Нагороди. В 2015 р. результати виконаних досліджень удостоєні Грамоти Президії НАН України на конкурсі наукових робіт студентів та молодих вчених НАН України (Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАНУ).

Публікації. Основні положення та наукові результати викладені в 21 публікації наукових робіт, в їх числі: 6 статей у наукових фахових виданнях України, перелік яких затверджено МОН України; 3 статті в зарубіжних виданнях (Російська Федерація); з опублікованих статей 7 представлені у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз даних (SCOPUS, Web of Science, Index Copernicus, Scholar, INSPEC, Ulrich's Periodicals Directory, РИНЦ); опубліковано 12 тез доповідей у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, трьох розділів, висновків і п'яти додатків. Загальний обсяг роботи становить 151 сторінку, з яких 67 сторінок займають рисунки і таблиці (всього 74 рисунка та 12 таблиць), 28 сторінок — додатки, 14 сторінок — список використаних джерел (118 найменувань).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розглянуто сучасний стан проблеми, обґрунтовано актуальність теми, викладена наукова новизна, сформульовані мета роботи і задачі, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети, зазначено особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію та публікації за результатами досліджень, дані відомості про впровадження, структуру та обсяг дисертації.

Перший розділ присвячений огляду науково-технічної літератури. Виконано аналіз сучасного стану досліджень ефективності плівкового охолодження плоскої пластини і лопаток газових турбін, визначено коло завдань, що вимагають подальшого дослідження. Розглянуто основні способи організації плівкового охолодження, серед яких – суцільна щілина, пористий поясок, поясок перфорації (ряди похилих циліндричних отворів) і плівкове охолодження за ділянкою теплообміну. Для цих схем отримано великий масив експериментальних даних і розрахункові рівняння, що мають високу достовірність. Розглянуто вплив різних факторів на ефективність плівкового охолодження плоскої пластини, таких як зовнішня турбулентність потоку, прискорення зовнішнього потоку, кривизна поверхні, крок отворів вдуву, геометрія отворів і розташування отворів під складним кутом до поверхні. Відзначено, що великий внесок у теорію і практику плівкового охолодження внесли роботи українських вчених (Дибан Є.П.,

Репухов В.М., Халатов А.А.), спеціалістів колишнього СРСР (Кутателадзе С.С., Леонтьєв О.І., Волчков Є.П., Губертов А.М., Богомолов Є.М., Арсеньєв 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.).

Традиційно в практиці газотурбобудування застосовуються схеми плівкового охолодження у вигляді системи одно- дво- і багаторядних циліндричних похилих отворів. Вони характеризується рядом недоліків. Основний з них – виникнення системи вторинних вихрових структур, основними з яких є «ниркові» вихори, які призводять до зниження ефективності плівкового охолодження. Розробкою і дослідженням альтернативних схем займаються вчені і конструктори провідних світових виробників ГТУ в США, Японії, Німеччини, Росії та Україні. Основними вимогами для нових технічних рішень є рівномірність покриття поверхні плівкою охолоджувача при всіх його витратах, висока теплофізичних ефективність, а також технологічність виробництва. Аналіз показав, що в даний час основна увага зосереджена на дослідженні наступних конфігурацій: профільованих отворів, тобто отворів складної форми - віялових («fan-shaped»), консольних і деяких інших; отворів, виходи з яких розміщені у заглибленнях - кратерах, напівсферичних заглибленнях або траншеї; анти-вихрових систем, з додатковими анти-вихровими отворами і парних отворів (double-jet).

Аналіз показує, що використання антиниркової вихрової схеми *парних отворів* (рис. 3) є найбільш перспективним способом плівкового охолодження на даному етапі. Така схема є подальшим розвитком технології виготовлення отворів під складним кутом, яка використовується в серійних виробах під час виготовлення отворів вхідної кромки робочих лопаток і соплових апаратів. Технологічність, можливість істотного зниження вартості при виготовленні парних отворів є головним чинником на користь використання цієї технології в практиці.

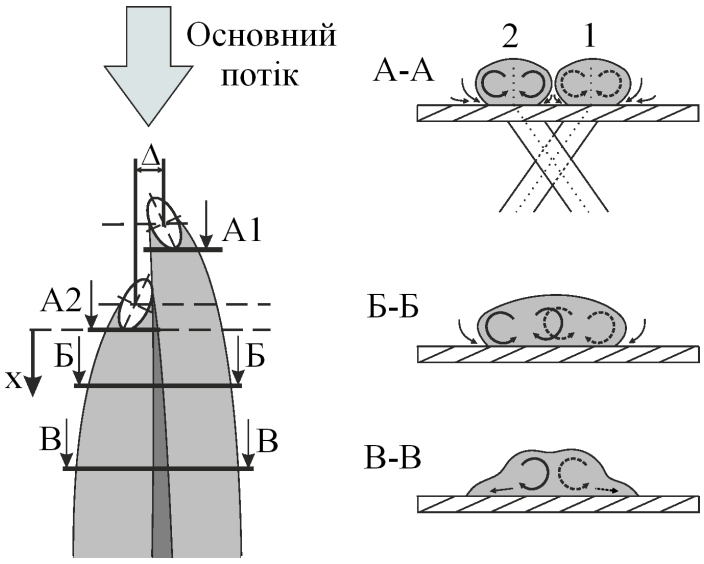


Рис. 1. Передбачувана структура вихрової течії за парними отворами.

У схемі парних отворів (рис. 3) отвори розташовуються під кутом α до поверхні і розвернуті в площині охолоджуваної пластини під кутами β_1 і β_2. На рис.1 представлена схема руху і взаємодії слідів струменів охолоджувача, що виходять з отворів 1 і 2 ряду. Початкова вихрова структура (у першому перетині А-А) містить класичні «ниркові» вихори. При накладанні струменів один на одного (перетин Б-Б) в області між отворами створюється зона підвищеного тиску і відбувається поступове перетворення вихрової структури з виникненням симетричної пари вихорів (перетин В-В), що обертаються в протилежних напрямках і забезпечують рух охолоджувача до поверхні з наступним його поперечним розтіканням.

Наприкінці розділу сформульовані *мета* та *завдання дослідження*. Враховуючи складну тривимірну турбулентну вихрову структуру потоку, в роботі обрано поєднання експериментального і теоретичного методів дослідження.

У другому розділі дано опис експериментальної установки, експериментальної ділянки (адіабатної пластини), системи парових отворів (double-jet) для подачі вторинного повітря, турбулізуючої решітки і криволінійних профілів для забезпечення зовнішньої турбулентності і прискорення основного потоку.

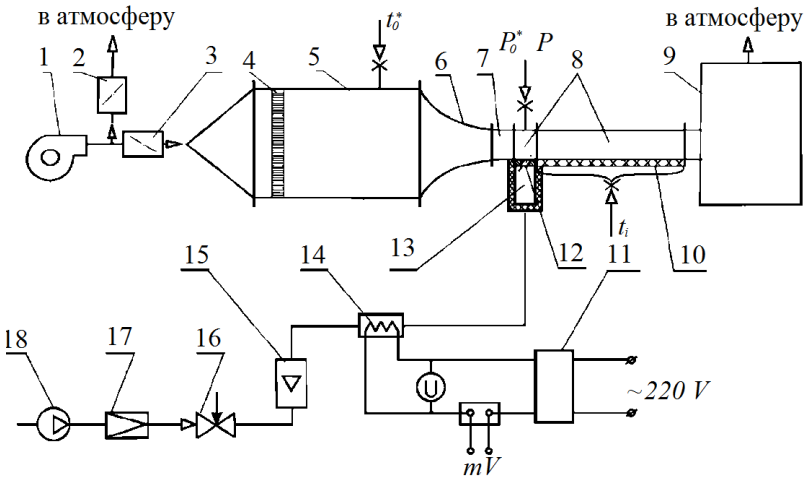


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 – вентилятор ВВД-5; 2, 3 – поворотні затулки; 4 – вирівнювальна сітка; 5 – ресивер; 6 – сопло Вітошинського; 7 – ділянка стабілізації; 8 – робоча ділянка; 9 – заспокоювач; 10 – адіабатна пластина; 11 – випрямляч; 12 – змінний блок з отворами подачі вторинного повітря; 13 – ресивер подачі вторинного повітря; 14 – нагрівач; 15 – ротаметр; 16 – вентиль; 17 – фільтр-регулятор; 18 – компресор.

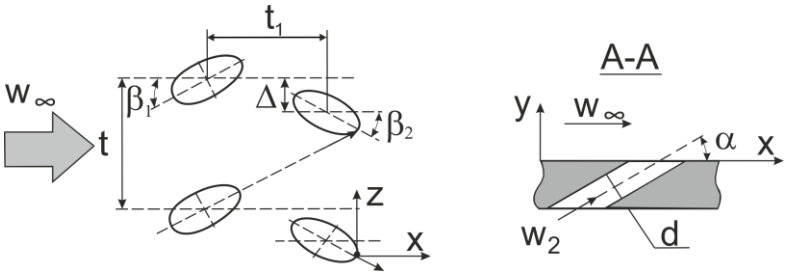


Рис. 3. Схема парних отворів, досліджена в роботі.

Експериментальна установка ІТТФ НАНУ (рис. 2) являє собою аеродинамічну трубу відкритого типу. Повітря в робочу ділянку 8 подається з атмосфери. Перед робочою ділянкою встановлено ресивер 5, що згладжує пульсації. Рівень турбулентності основного потоку на виході з сопла Вітошинського складає менше 1%. Вторинний потік подається окремим компресором 18 і підігрівається нагрівачем 14. Установка забезпечена системою вимірювань. Вивчається схема плівкового охолодження із зворотним напрямком теплового потоку (нагрівається вторинний потік).

Експериментальна ділянка представляє собою плоский прямокутний канал, нижня стінка якого складається з змінного блоку отворів для подачі вторинного повітря 12 і адіабатної пластини 10, що виконана з азбоцементу ($\lambda = 0{,}17$ Вт/м·К). У пластину по центральній лінії з постійним кроком 10 мм вмонтовані 9 хромель-алюмелевих термопар діаметром 0,5 мм. Всі термопари попередньо градуювалися в ультратермостаті типу УТ-15 з використанням зразкового ртутного термометра з ціною поділки 0,1 °С, при цьому холодні спаї поміщалися в посудину Дюара з льодом, який тане. Для визначення поперечного розподілу температури адіабатної поверхні передбачена можливість переміщення пластини в поперечному напрямку.

На рис. 3 представлена досліджена в роботі схема парних отворів. Діаметр циліндричних отворів, що подають вторинний потік $d = 3{,}2$ мм, поперечний крок розташування отворів $t = 12{,}8$ мм ($t/d = 4$), поздовжній крок між першим і другим

рядом t_1 = 10 мм (t_1/d = 3,125d). Кут нахилу отворів до поверхні $\alpha = 30^o$, поперечні кути нахилу отворів $\beta_1 = \beta_2 = 30^o$. Повздовжня відстань «x» відраховується від задньої кромки отвору другого ряду.

Відстань (перекриття, зазор) між отворами Δ відіграє значну роль у формуванні антиниркової вихрової структури. В зв'язку з тим, що надійні рекомендації щодо параметра Δ в публікаціях відсутні, для забезпечення максимального значення ефективності плівкового охолодження при обраних кутах α, β_1 і β_2 було проведене комп'ютерне моделювання. Його результати (рис.16) показали, що для кутів $\alpha = 30^o$ та $\beta_1 = \beta_2 = 30^o$ середня оптимальна величина Δ/d складає 1,3. Ця величина була закладена в конструкцію ділянки вдуву вторинного потоку.

Параметри експериментів вибирались на основі аналізу опублікованих даних. Основною вимогою було забезпечення турбулентного режиму течії основного потоку перед пристроєм подачі охолоджувача. У зв'язку з цим параметри експериментів були наступними: швидкість основного потоку — 35...38 м/с, температура основного потоку змінювалася від 23,5 до 26 ºС, температура повітря, що вдувалося — від 64 до 79 ºС. Відношення густин вторинного і основного потоків становило 0,85…0,88; параметр вдуву m змінювався від 0,5 до 3,0; число Рейнольдса $Re_{d экв}$, що визначається за еквівалентним діаметром каналу і швидкості потоку на вході, дорівнює $1{,}25 \cdot 10^5$. Досліджувався випадок зворотнього теплового потоку: основний потік — холодний, вторинний — нагрітий.

Для створення *зовнішньої турбулентності* використовувався пристрій, який встановлювався перед соплом Вітошинського. Він являє собою перфоровану пластину (турбулізуючу решітку), яка забезпечувала рівень турбулентності близько 7%, що відповідає рівню турбулентності перед сопловими апаратами першої і другої ступені газових турбін.

В експериментах з *прискоренням потоку* використовувалися почергово два змінних криволінійних профілі, які закріплювались знизу до верхньої кришки робочої ділянки. Профіль №1 забезпечував постійний по довжині градієнт тиску, котрий становив близько 7000 Па/м. Профіль №2 забезпечував змінний по довжині градієнт тиску, близький до лінійного закону в діапазоні від 5000 до 20000 Па/м. Для обох профілів параметр прискорення потоку K був близький до лінійного закону і не перевищував критичного значення ($K \sim 3 \times 10^{-6}$), що відповідає зворотному переходу турбулентного примежового шару в ламінарний.

Перед основними експериментами були проведені *тестові експерименти* з подачею нагрітого вторинного повітря через нормальну щілину (ширина щілини s = 3 мм, кут подачі —90°). Отримані дані тестових експериментів з похибкою ±15% узгоджуються з класичною залежністю Себана Р.А. (США).

Оцінка похибки вимірювань показала, що середня по довжині пластини відносна похибка визначення ефективності плівкового охолодження становить ±6%, параметра вдуву — ±4,3%, числа Рейнольдса — ±1,5%.

У третьому розділі наведені результати експериментального дослідження локальної та середньої ефективності плівкового охолодження плоскої пластини при подачі охолоджувача через парні отвори на вході.

Результати експериментального визначення локальних значень ефективності плівкового охолодження наведено на рис. 4. Аналіз цих даних показує, що для всіх

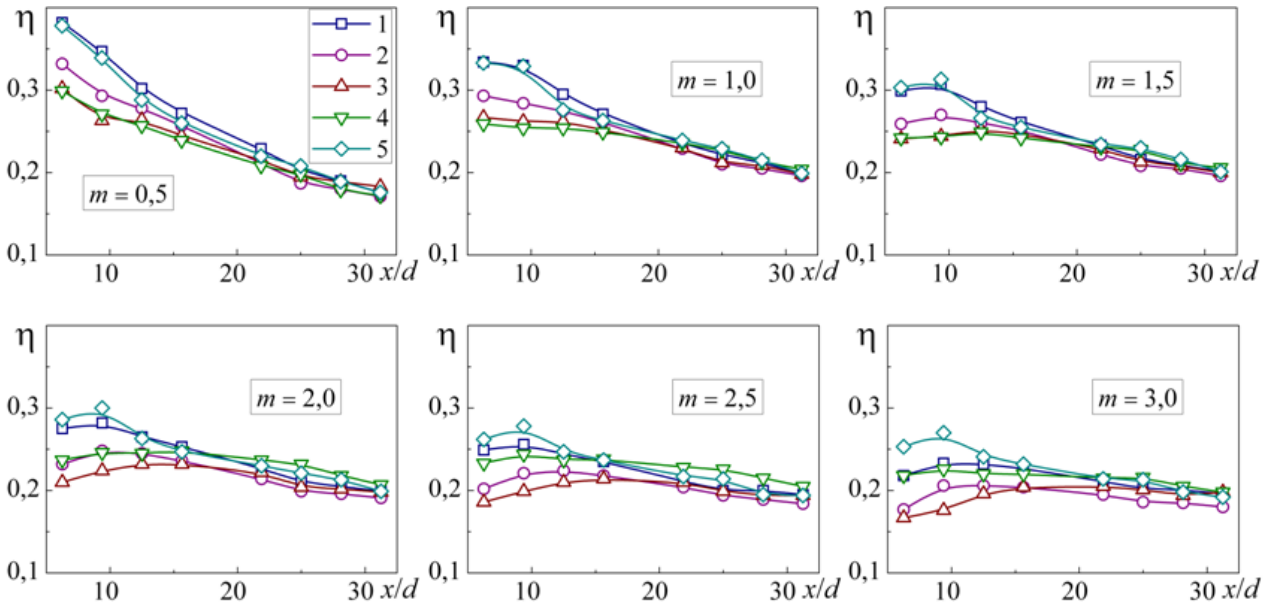


Рис. 4. Локальна ефективність плівкового охолодження за парними отворами: 1 – z/t = 0; 2 – z/t = 0,25; 3 – z/t = 0,5; 4 – z/t = 0,75; 5 – z/t = 1,0.

значень параметра вдуву m ефективність плівкового охолодження по довжині пластини зменшується; причому зі збільшенням m ефективність плівкового охолодження при x/d=*const* знижується.

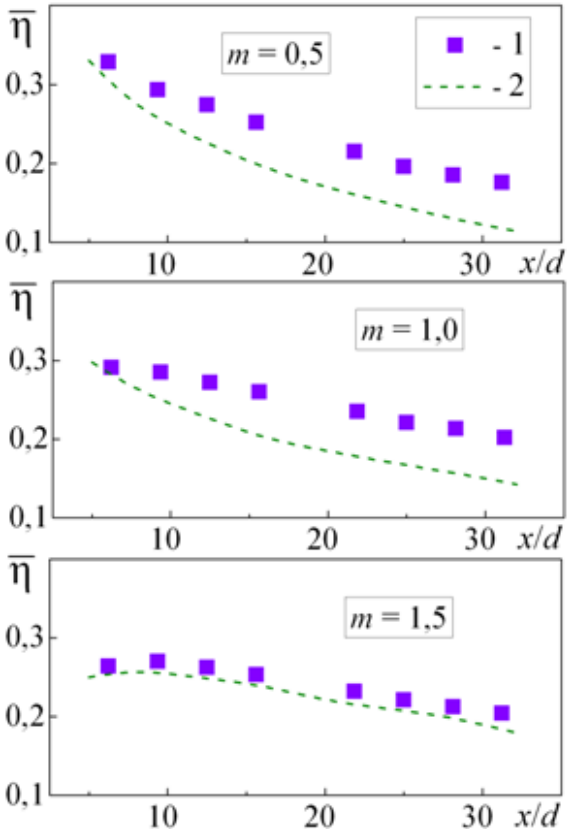


Рис. 5. Подовжній розподіл середньої по ширині пластини ефективності плівкового охолодження: 1 – результати даної роботи, парні отвори (t/d = 4,0); 2 – традиційна дворядна схема дискретних отворів (t/d = 4,0).

На рис. 5 наведено осереднені по ширині значення ефективності плівкового охолодження за парними отворами. Осереднення локальних значень проводилося за рівнянням $\bar{\eta} = \frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{4}(\eta_i + \eta_{i+1})$. Отже, при m = 0,50 та m = 1,0 отримані дані для дослідженої схеми парних отворів перевищують дані традиційної (β = 0) дворядної схеми отворів з таким же кроком t/d = 4,0, але при m = 1,5 вони практично відповідають їм.

Узагальнення дослідних даних по середній ефективності плівкового охолодження з урахуванням впливу зовнішньої турбулентності і прискорення потоку проводилося з використанням принципу добутку окремих впливів (Кутателадзе С.С. та Леонтьєв О.І.), який широко використовується в практиці розрахунку плівкового охолодження. Результуюча (середня по ширині пластини) ефективність охолодження записується у вигляді рівняння:

$$\bar{\eta} = \bar{\eta}_0 \cdot \varepsilon_{Tu} \cdot \varepsilon_{dp}, \qquad (1)$$

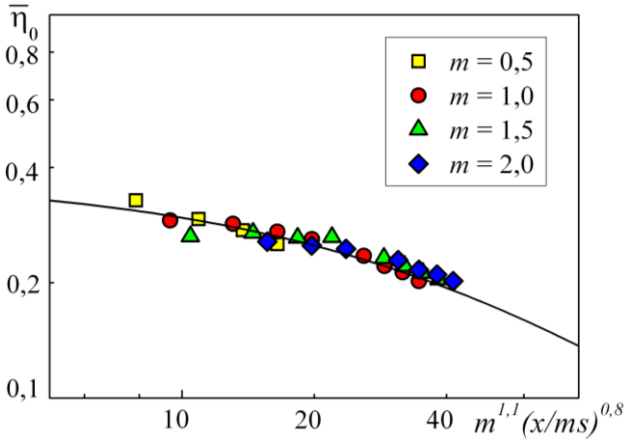


Рис. 6. Результати узагальнення дослідних даних щодо середньої ефективності плівкового охолодження за парними отворами ($Tu = 1\%, dP/dx = 0$).

де $\bar{\eta}_0$ — середня по ширині пластини ефективність плівкового охолодження пластини без будь-яких впливів; ε_{Tu} та ε_{dp} — відносні функції, що враховують вплив турбулентності та прискорення потоку.

Узагальнення дослідних даних для безградієнтної течії при низькій турбулентності зовнішнього потоку (1%) дозволило отримати наступне узагальнююче рівняння (базову залежність):

$$\bar{\eta}_0 = \frac{1{,}5}{t/d + 0{,}13m^{1,1}(x/sm)^{0,8}}, \qquad (2)$$

де s — ширина еквівалентної щілини. Порівняння результатів розрахунку по рівнянню (2) з експериментальними даними представлено на рис. 6. Максимальне відхилення дослідних даних від узагальнюючого рівняння (2) на ділянці $x/d < 10$ не перевищує 10%.

Порівняння з іншими перспективними схемами. Виконане в роботі порівняння показало, що ефективність плівкового охолодження за парними отворами при малих і помірних значеннях параметру вдуву ($m \le 1{,}0$) співрозмірна з ефективністю інших перспективних схем плівкового охолодження (траншея, кратери, отвори у сферичних поглибленнях і т.д.), але при $m = 1{,}5$ и $m = 2{,}0$ на ділянці $x/d < 15{,}0$ значно поступається їм.

Ступінь поперечної нерівномірності ефективності плівкового охолодження. На рис. 7 представлені результати визначення локальної ефективності плівкового охолодження в поперечному напрямку для різних перетинів при $m = 1{,}0$. У першому вимірювальному перетині $x/d = 6{,}25$ поперечна нерівномірність плівкового охолодження вельми значна. Однак при збільшенні поздовжньої координати нерівномірність охолодження поступово знижується і при $x/d = 15$ не перевищує 10%, що є прийнятним в практичних застосуваннях.

Для характеристики ступеня нерівномірності у роботі було використано наступне відношення:

$$\varepsilon = \frac{\eta_{max} - \eta_{min}}{\bar{\eta}}, \qquad (3)$$

де $\bar{\eta}$ — середнє значення ефективності плівкового охолодження в заданому перерізі; η_{max}, η_{min} — максимальне і мінімальне значення локальної ефективності у тому ж перерізі.

На рис. 8 представлені результати узагальнення дослідних даних по ступеню нерівномірності. У даній обробці не вдається виявити однозначний вплив параметру вдуву m і всі дослідні дані розташовуються у вузькому «коридорі» шириною $\varepsilon \approx 0{,}10$ між даними, що характеризують максимальне і мінімальне значення ε. Найбільш висока ступінь поперечної нерівномірності спостерігається на ділянці $x/d < 15$, де

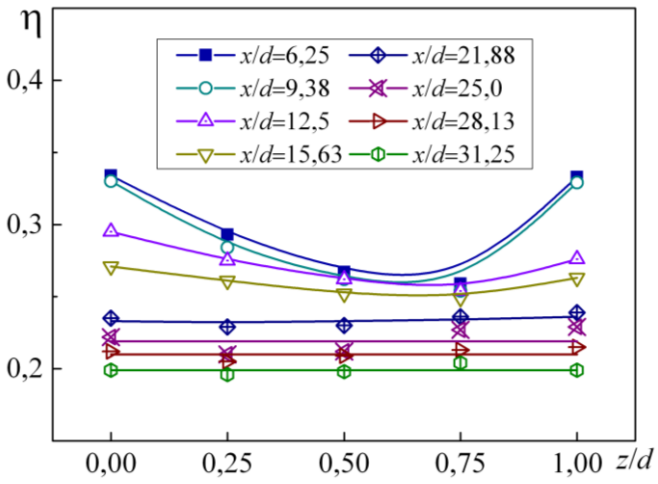


Рис. 7 Поперечний розподіл локальної ефективності плівкового охолодження при $m = 1{,}0$ за парними отворами.

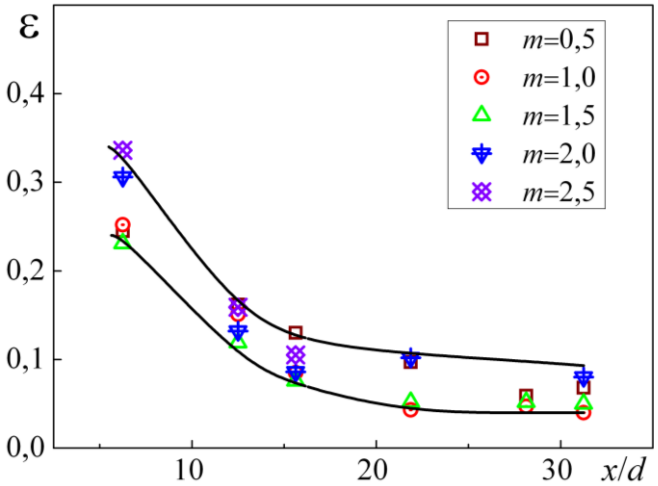


Рис. 8. Ступінь поперечної нерівномірності ефективності плівкового охолодження плоскої пластини за парними отворами.

відбувається швидке її зниження. Для всіх значень параметра вдуву m «покриття» поверхні плівкою охолоджувача зі ступенем нерівномірності менше 10% ($\varepsilon < 0{,}10$) досягається на основній ділянці пластини при $x/d > 15$.

Прискорення потоку (рис. 9) у діапазоні зміни параметру K від $0{,}5\ 10^{-6}$ до $3{,}5\ 10^{-6}$ (профілі №1 та 2) знижує ефективність плівкового охолодження по всійдовжині пластини. Узагальнення дослідних даних дозволило отримати поправку в рівнянні (1) у формі степенної залежності $\varepsilon_{dp}=(w/w_0)^{-n}$, де n=0,15+0,57exp(-m).

Зовнішня турбулентність (рис. 10) має незначний вплив на середню ефективність плівкового охолодження. Для практичних розрахунків відносну функцію ε_{Tu} у рівнянні (1) можна прийняти рівною 1,0.

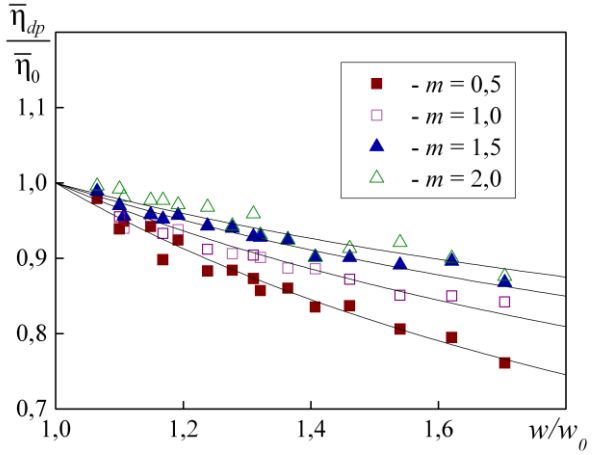


Рис. 9 Вплив прискорення зовнішнього потоку на середню ефективність плівкового охолодження за парними отворами.

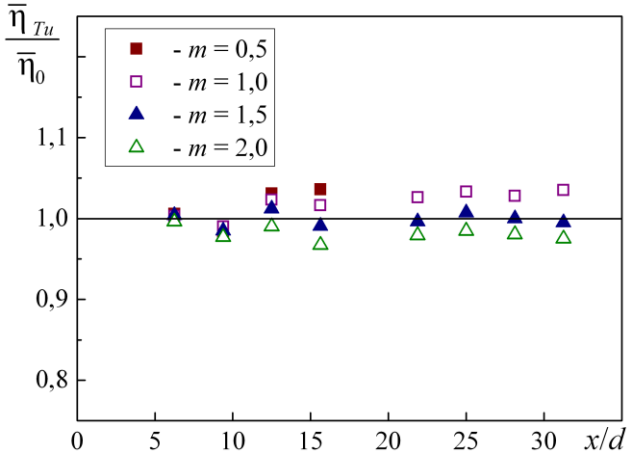
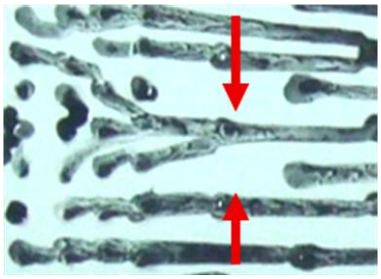


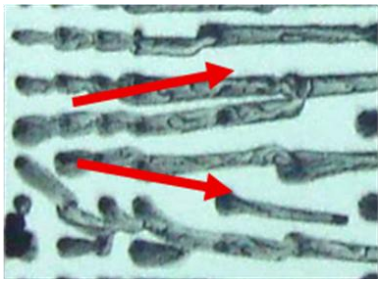
Рис. 10. Вплив зовнішньої турбулентності на середню ефективність плівкового охолодження за парними отворами.

Для визначення фізичної структури потоку біля поверхні пластини була виконана *візуалізація* поверхневих ліній течії методом сажо-масляних крапок. Для цього в рослинну олію додавався чорний барвник, а на поверхні пластини розміщувався гладкий картон, на який наносилися олійні краплі.

Для аналізу обрано випадок, що відповідає параметру вдуву $m = 1{,}0$ (рис. 11). Поверхнева візуалізація показала істотні поперечні «стікання» ліній течії за



а



б

Рис. 11. Поверхневі лінії течії при $m = 1{,}0$: а – традиційні отвори; б – парні отвори.

традиційними похилими отворами (рис. 11а), що підтверджує існування інтенсивного «ниркового» вихору. Поперечні «розтікання» поверхневих ліній течії за парними отворами (рис. 11б) опосередковано свідчать про формування антиниркової вихрової структури з поперечним розтіканням потоку. Однак візуалізація не дала змоги розкрити фізичну структуру потоку. Визначення фізичної структури потоку і факторів, що впливають на ефективність плівкового охолодження, було виконано за допомогою комп'ютерного моделювання.

Комп'ютерне моделювання. Першим кроком до визначення фізичної структури було визначення моделей турбулентності, що адекватно описують плівкове охолодження в досліджуваних умовах. Аналіз виконано для безградієнтного і низкотурбулентного обтікання пластини (1%). У роботі вивчені 6 моделей турбулентності: чотири *RANS* та дві *RSM* моделі турбулентності, які рекомендовані для розрахунку вихрових і закручених потоків. Моделі *k-ε* групи представлені стандартною *k-ε* моделлю та *RNG k-ε* моделлю, моделі *k-ω* групи — стандартною *k-ω* моделлю та *SST* моделлю Ментера, а також двома моделями напружень Рейнольдса (*RSM*) — *SSG* та *LRR*. Для порівняння використані власні експериментальні данні.

Комп'ютерна модель. Досліджувана геометрична 3*D*-модель плівкового охолодження плоскої поверхні з подачею охолоджувача через парні похилі циліндричні отвори була побудована в ANSYS Design Manager. Вона являє собою канал прямокутного перерізу, до якого охолоджувач подається із зовнішнього об'єму (плenуму) через парні отвори (рис. 12). Схема розташування отворів і їх геометричні розміри були прийняті такими ж, як і в експериментальному дослідженні (рис. 3). Довжини попередньо включеної та основної ділянок моделі складали $x/d = 25$ та $x/d = 50$ відповідно.

Розрахункова сітка. При чисельному моделюванні використовувалася неструктурована комбінована розрахункова сітка, яка складалася з 3,8 млн. елементів і 990 тис. вузлів. Біля поверхні пластини, коло отворів і поблизу стінок плenуму виконано згущення сітки розмірністю в 20 чарунок. Значення параметру y^+ у всіх випадках знаходилося в межах від 0,5 до 1,1, що задовольняє умовам моделювання із застосуванням *RANS* моделей турбулентності.

Граничні умови на вході і виході моделі були задані близькими до умов виконаних експериментів, розташування ділянок завдання граничних умов представлено на рис. 12. Температура основного потоку на вході становила 25 °C, потоку, що вдувався — 72°C. На вході в канал середня швидкість основного потоку задавалася рівною 37,8 м/с. Граничні умови для потоку, що вдувався через два ряди отворів, відповідали значенням параметру вдуву $m = 0{,}5$; 1,0 та 1,5. Інтенсивність турбулентності основного потоку на вході приймалася рівною 1%. На виході з моделі середній статичний тиск задавався атмосферним та становив 101300 Па.

Розрахунки проводилися при числах Рейнольдса $Re_{декв}$, визначених по еквівалентному діаметру каналу і швидкості основного потоку, в діапазоні (0,9…1,25) 10^5.

На рис. 13 представлені результати тестових розрахунків середньої ефективності плівкового охолодження для 6 моделей турбулентності. Як видно, при m = 0,5 всі моделі турбулентності показують задовільне узгодження з експериментальними даними. Кращі результати отримані при використанні k-ε моделі турбулентності, в цьому випадку розбіжність результатів моделювання та експерименту не перевищує 10%. При m = 1,0 та m = 1,5 всі моделі дають завищені результати в порівнянні з наявними експериментальними даними на ділянці x/d < 10…20. Це можна пояснити зростанням рівня турбулентності при змішуванні потоків сусідніх струменів, складною тривимірною вихровою структурою течії поблизу стінки, а також впливом на результати комп'ютерного моделювання факторів обчислювального характеру.

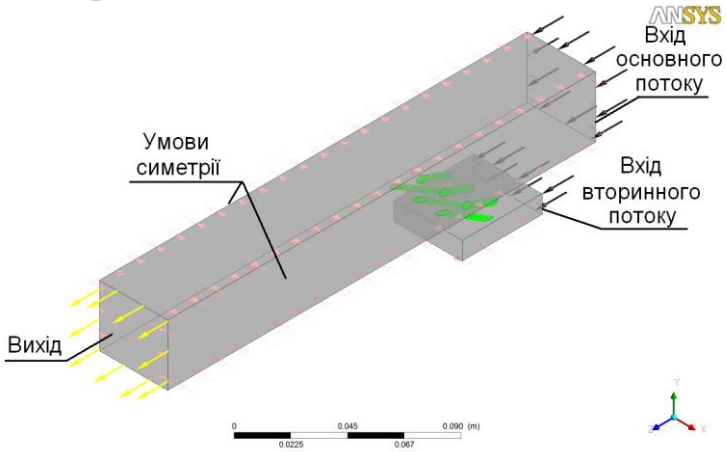


Рис. 12. Геометрична 3D-модель плівкового охолодження плоскої поверхні при вдуві охолоджувача через парні отвори.

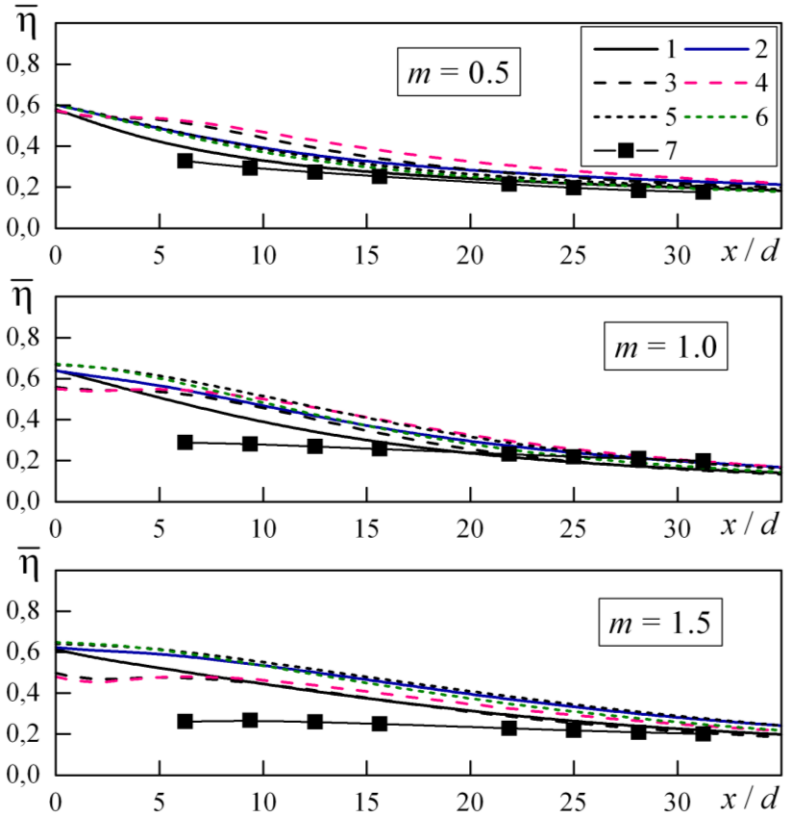


Рис. 13. Середня ефективність плівкового охолодження: 1 – k-ε модель; 2 – *RNG* k-ε модель; 3 – k-ω модель; 4 – *SST* k-ω – модель; 5 – *LLR RSM*; 6 – *SSG RSM*; 7 – експериментальні дані.

Таким чином, при комп'ютерному моделюванні плівкового охолодження з подачею охолоджувача через систему парних отворів при низькотурбулентному та безградієнтному обтіканні пластини при малих (m = 0,50) та помірних (m =1,0; x/d > 10) параметрах вдуву найкраще наближення показує k-ε модель турбулентності.

Фізична структура потоку і фактори, що характеризують ефективність плівкового охолодження (рис.14-15). При комп'ютерному моделюванні фізичної структури використовувалася k-ε модель турбулентності, яка показала найкращі результати при тестуванні. Для порівняння розглядалася також традиційна дворядна схема отворів, з таким же кроком t/d = 4,0. Так само, як і при проведенні експериментів,

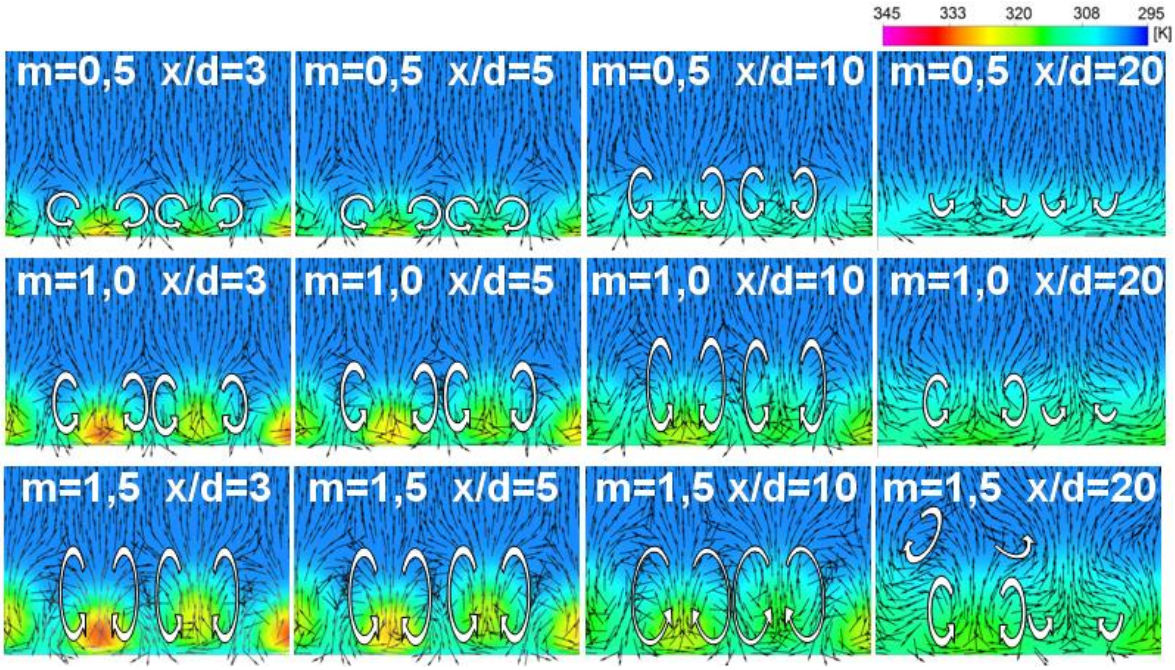


Рис. 14. Температурні поля і проекції векторів швидкості за традиційною схемою плівкового охолодження.

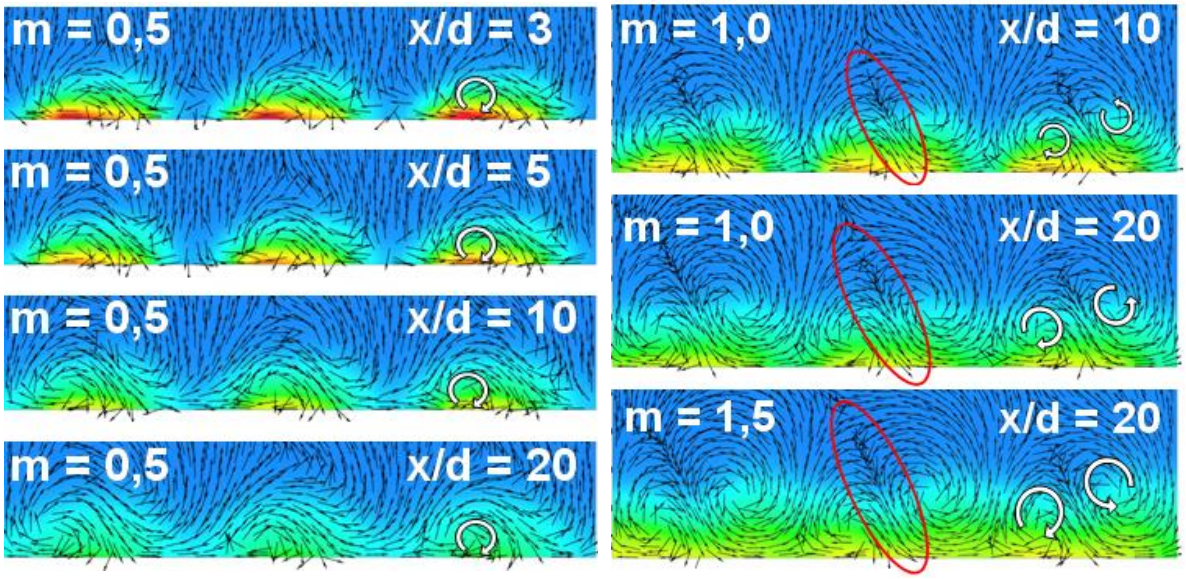


Рис. 15. Температурні поля і проекції векторів швидкості за парними отворами.

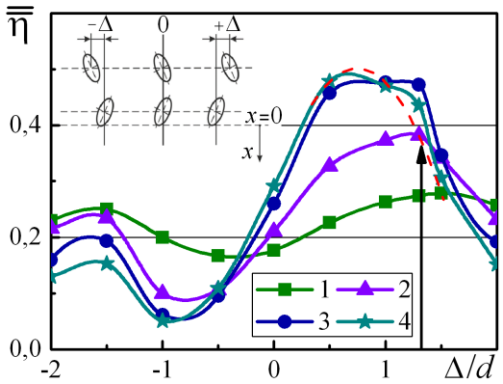


Рис. 16. Влив відношення Δ/d на величину $\bar{\bar{\eta}}$: 1 – $m = 0{,}5$; 2 – $m = 1{,}0$; 3 – $m = 1{,}5$; 4 – $m = 2{,}0$.

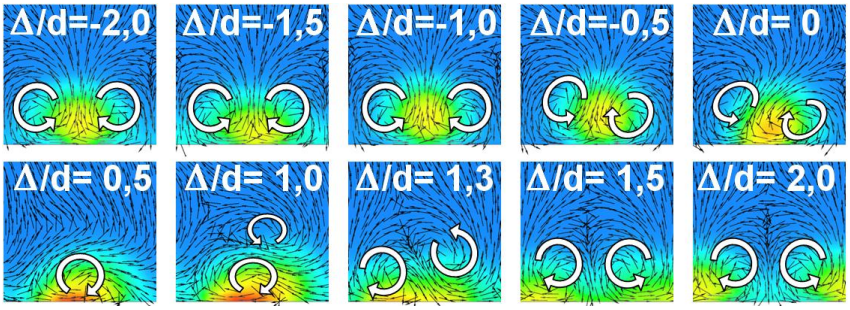


Рис. 17. Температурні поля і проекції векторів швидкості за парними отворами залежно від відношення Δ/d при $m = 1{,}0$ на відстані $x/d = 10$.

порівняльний аналіз зроблений для випадку зворотного теплового потоку: основний потік — холодний, потік, що вдувається — нагрітий.

Традиційна схема. На рис. 14 представлені температурні поля і проекції векторів швидкості в поперечних перерізах на відстанях x/d = 3; 5; 10 та 20 від зрізу отворів другого ряду при m = 0,5; 1,0 та 1,5. За рядами традиційних отворів чітко видно характерні вихрові структури у формі «ниркового» вихору, які погіршують умови охолодження. При всіх параметрах вдуву «нирковий» вихор розвивається за довжиною ділянки (x/d). Чим більше параметр вдуву m, тим більш інтенсивний «нирковий» вихор спостерігається поблизу поверхні пластини.

Парні отвори. При комп'ютерному моделюванні використовувалася k-ε модель турбулентності, яка показала найкращі результати при порівнянні з експериментальними даними для m = 0,5 та 1,0 ($x/d \geq 10$). При m = 1,5 дані розрахунку взяті для перетину x/d = 20, де збіг розрахункових та експериментальних даних також задовільний. Для аналізу фізичної структури потоку за парними отворами розглянуто ті ж перетини (рис. 15), що і для традиційних отворів. При m = 0,5 в потоці формується одиничний інтенсивний несиметричний вихор, який перешкоджає надходженню повітря з основного потоку до поверхні пластини. При m = 1,0 біля поверхні пластини формується антиниркова структура потоку з напрямком обертання вихорів, протилежним напрямку обертання класичних «ниркових» вихорів. При m = 1,5 вихрова структура стає більш інтенсивною. Зниження ефективності плівкового охолодження може бути обумовлено утворенням застійної зони на початковій ділянці (відрив струменя від поверхні).

Таким чином, виконані дослідження підтвердили гіпотезу про те, що основними факторами більш високої ефективності плівкового охолодження в порівнянні з традиційною схемою при $m \leq 1{,}0$ є перетворення «ниркових» вихорів і формування антиниркової вихрової структури потоку, що притискає потік охолоджувача до поверхні і перешкоджає надходженню зовнішнього потоку до стінки.

Вплив поперечної відстані між отворами Δ *на ефективність плівкового охолодження.* Як зазначалося раніше (розд. 2), поперечна відстань Δ між отворами першого і другого ряду має значний вплив на ефективність плівкового охолодження. Вплив відношення Δ/d на осереднену по поверхні ефективність плівкового охолодження представлено на рис. 16 (комп'ютерне моделювання). Отже, залежно від відношення Δ/d середня ефективність плівкового охолодження змінюється по кривій з максимумом, причому значення $(\Delta/d)_{\text{опт}}$, що відповідає максимуму ефективності, змінюється від 1,5 до 0,5 при збільшенні параметра вдуву від 0,5 до 2,0. При $\Delta/d < 0$ спостерігається значне зниження ефективності плівкового охолодження.

Обробка даних моделювання (рис. 16), в діапазоні зміни Δ/d від 0,5 до 1,5 для кутів $\alpha = \beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$ при m = 0,5–2,0, дозволила вперше отримати рівняння для осередненої по поверхні ефективності плівкового охолодження $\bar{\bar{\eta}} = 0{,}28 + 0{,}58(\Delta/d) - 0{,}39(\Delta/d)^2$. Для відношення $(\Delta/d)_{\text{опт}}$ вперше отримано залежність від параметра вдуву m:

$$(\Delta/d)_{\text{опт}} = -0{,}125 + 1{,}41m - 0{,}3m^2 \qquad (4)$$

Аналіз фізичної структури потоку за парними отворами при різних значеннях Δ/d (рис. 17, поля температур і проекції векторів швидкості в поперечній площині на відстані $x/d = 10$ від задньої кромки другого ряду при $m = 1{,}0$) показав, що для розглянутого випадку ($\alpha = \beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$) найкращими теплозахисними властивостями володіє антиниркова несиметрична вихрова структура потоку з нахилом сусідніх вихорів в праву сторону (рис. 16, $\Delta/d = 1{,}3$).

ВИСНОВКИ ПО РАБОТІ

В дисертації вперше виконано експериментальне і теоретичне дослідження фізичного механізму і закономірностей плівкового охолодження плоскої пластини при подачі охолоджувача через парні (антиниркові вихрові) отвори на вході в умовах прискорення потоку і зовнішньої турбулентності. Отримані нові експериментальні залежності, визначено адекватні моделі турбулентності та фактори, що характеризують фізичний механізм плівкового охолодження, отримана залежність для оптимального співвідношення $(\Delta/d)_{опт}$.

Основні наукові результати і висновки полягають у наступному:

1. На основі поверхневої візуалізації та комп'ютерного моделювання фізичної структури потоку показано, що основними факторами більш високої ефективності плівкового охолодження в порівнянні з традиційною схемою при $m \le 1{,}0$ є перетворення «ниркових» вихрів і формування антиниркової вихрової структури з поперечним розтіканням охолоджувача близько поверхні, що перешкоджає надходженню зовнішнього потоку до охолоджуваної стінки.

2. 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 низькотурбулентному ($Tu \approx 1\%$) обтіканні пластини.

3. Показано, що для досліджених умов зовнішня турбулентність ($Tu \approx 7\%$) має незначний вплив на середню ефективність плівкового охолодження. У діапазоні зміни параметра K від $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ до $3{,}5 \cdot 10^{-6}$ прискорення потоку знижує ефективність плівкового охолодження до 25% ($m = 0{,}5$); вперше запропоновано поправку до базового рівняння у формі степеневої залежності..

4. Показано, що при низькому значенні параметра вдуву ($m = 0{,}5$) всі розглянуті в роботі *RANS* моделі турбулентності (*k-ε*, *RNG k-ε*, *k-ω*, *SST k-ω*, *LLR RSM*, *SSG RSM*) показують завищене, але задовільне наближення до отриманих експериментальних даних; при цьому кращі результати (перевищення до 10%) демонструє *k-ε* модель турбулентності. При $m = 1{,}0$ і $m = 1{,}5$ на ділянці $x/d < 10 \ldots 20$ всі моделі показують завищені результати (від 10 до 30%).

5. На основі комп'ютерного моделювання показано, що при заданих значеннях кутів β_1 і β_2 поперечна відстань Δ між отворами першого і другого ряду, має значний вплив на ефективність плівкового охолодження, яка змінюється по кривій з максимумом. Оптимальне значення $(\Delta/d)_{опт}$, 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 $(\Delta/d)_{опт}$.

6. При ідентичних умовах середня ефективність плівкового охолодження плоскої поверхні за парними отворами при малих (m = 0,50) і помірних (m = 1,0) значеннях параметра вдуву на 20-25% вище, ніж для традиційної системи охолодження і відповідає їй при m = 1,5 і більше.

7. Отримані в роботі результати рекомендуються до використання в газотурбобудуванні, теплоенергетиці, теплотехніці при створенні систем охолодження високотемпературних елементів з плівковим охолодженням дослідженого типу. Значний інтерес для подальшого дослідження становить вивчення фактора неізотермічності основного і вторинного потоків, поздовжньої кривизни і обертання поверхні, що омивається.

8. Матеріали дисертації знайшли застосування при розробці методики розрахунку ефективності плівкового охолодження соплових лопаток високотемпературних ГТД для ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» (спільно з Інститутом технічної теплофізики НАНУ, акт використання від 16.01.2015 р., акт впровадження від 15.11.2013 р.), а також у навчальному процесі Фізико-технічного інституту НТУУ «КПІ» (акт використання від 27.01.2015 р.).

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА ІНДЕКСИ

Позначення: α — кут нахилу отворів до поверхні, що захищається, [°]; β — кут нахилу отвору в поперечному напрямі, [°]; Δ — поперечна відстань між отворами першого і другого ряду, [м]; $\eta = (T_\infty - T_{aw}) / (T_\infty - T_2)$ — локальна ефективність плівкового охолодження; $\bar{\eta}$ — середня по ширині пластини ефективність плівкового охолодження; $\bar{\bar{\eta}}$ — середня по поверхні пластини ефективність плівкового охолодження; d — діаметр отвору для подачі охолоджувача, [м]; $d_{екв}$ — еквівалентний діаметр каналу, [м]; $\mathrm{d}P / \mathrm{d}x$ — градієнт тиску, [Па/м]; $K = \frac{\nu_\infty}{w_\infty^2}\frac{\mathrm{d}w_\infty}{\mathrm{d}x}$ — параметр прискорення основного потоку; $m = w_2\rho_2 / w_\infty\rho_\infty$ — параметр вдуву; P — тиск, [Па]; $Tu = \sqrt{\left(\overline{w_x'^2} + \overline{w_y'^2} + \overline{w_z'^2}\right) / 3\overline{w_\infty}^2}$ — інтенсивність турбулентності потоку; Re — число Рейнольдса; x, y, z — прямокутні координати, [м]. **Індекси:** ∞ — основний потік; 2 — вторинний потік; *aw* — адіабатна стінка; 0 — без градієнту тиску та зовнішньої турбулентності, *Tu* — при наявності зовнішньої турбулентності, *dp* — при прискоренні потоку.

СПИСОК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті:

1. Эффективность двухструйного пленочного охлаждения плоской пластины/ А.А. Халатов, И.И. Борисов, Ю.Я. Дашевский, **Н.А. Панченко**, А.С. Коваленко, С.В. Шевцов // Промышленная теплотехника. — 2014. — Т. 36, №1. — С. 20–26. **(фахове видання України)** *Здобувач брав участь у розробці робочої ділянки, проведенні експериментів, обробці та аналізі отриманих результатів, проведенні порівняльного аналізу ефективності плівкового охолодження за парними отворами з іншими перспективними системами плівкового охолодження.*

2. Flat plate film cooling from a double jet holes: influence of free-stream turbulence and flow acceleration/ A.A. Khalatov, I.I. Borisov, **N.A. Panchenko**, Yu.J. Dashevskyy, A.S. Kovalenko // Thermophysics and Aeromechanics, —2014, —Vol. 21, No. 5. —pp.545-552. **(SCOPUS, Web of Science)** *Здобувач брав участь у проведенні експериментів, обробці, розрахунках і аналізі отриманих результатів щодо впливу зовнішньої турбулентності і прискорення потоку на ефективність плівкового охолодження, перекладі статті.*

3. Пленочное охлаждение плоской поверхности системой парных отверстий: влияние внешней турбулентности и ускорения потока / А.А. Халатов, И.И. Борисов, **Н.А. Панченко**, Ю.Я. Дашевский, А.С. Коваленко // Теплофизика и аэромеханика. —2014. — Т. 21, №5. — С. 571-578. **(Видання Російської Федерації, РИНЦ)** *Здобувач брав участь у проведенні експериментів, обробці, розрахунках і аналізі отриманих результатів щодо впливу зовнішньої турбулентності і прискорення потоку на ефективність плівкового охолодження.*

4. Эффективность пленочного охлаждения за парными отверстиями и отверстиями в сферических углублениях / А.А. Халатов, И.И. Борисов, **Н.А. Панченко**, М.В. Безлюдная, Ю.Я. Дашевский // «Вісник Інженерної академії України». — 2014. — №2. — С. 208-213. **(фахове видання України, Scholar)** *Здобувач брав участь у проведенні експериментів, обробці, розрахунках і аналізі отриманих результатів щодо впливу прискорення потоку на ефективність плівкового охолодження за парними отворами.*

5. Двухструйное пленочное охлаждение плоской поверхности: влияние внешней турбулентности / А.А. Халатов, **Н.А. Панченко**, И.И. Борисов, Ю.Я. Дашевский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. — 2014. — № 11(1054).— С. 53–60. **(фахове видання України, Ulrich's Periodicals Directory)** *Здобувач брав участь у проведенні експериментів та аналізі отриманих результатів щодо виявлення впливу зовнішньої турбулентності на ефективність плівкового охолодження.*

6. Неравномерность двухструйного пленочного охлаждения / А.А. Халатов, **Н.А. Панченко**, И.И. Борисов, Ю.Я Дашевский // Авиационно-космическая техника и технология. — 2014. — №8/115. — С. 94-99. **(фахове видання України, Index Copernicus, Scholar, Ulrich's Periodicals Directory)** *Здобувач брав участь у проведенні експериментів і аналізі отриманих результатів з нерівномірності ефективності плівкового охолодження.*

7. Экспериментальное исследование перспективных двухрядных схем пленочного охлаждения / А.А. Халатов, И.И. Борисов, **Н.А. Панченко**, М.В. Безлюдная, Ю.Я. Дашевский // Труды Шестой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-6), Москва, Россия, 27-31 октября 2014 г.,— 4 с. – Электрон. дан. – М. : «Издательский дом МЭИ», 2014. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с этикетки диска. **(Видання Російської Федерації)** *Здобувач брав участь у проведенні експериментів та аналізі результатів з ефективності плівкового охолодження за парними отворами.*

8. Перспективные способы пленочного охлаждения: влияние ускорения основного потока / А.А. Халатов, **Н.А. Панченко**, М.В. Безлюдная, И.И. Борисов, Ю.Я. Дашевский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси

й устаткування. — 2015. — № 15(1124).— С. 56–62. **(фахове видання України, Ulrich's Periodicals Directory)** *Здобувач брав участь у проведенні експериментів, обробці та аналізі отриманих результатів щодо впливу прискорення потоку на ефективності плівкового охолодження за парними отворами.*

9. **Панченко Н.А.** Компьютерное моделирование пленочного охлаждения при подаче охладителя через парные отверстия / **Н.А. Панченко** // Вестник двигателестроения. — 2015. — №2/2015. — С. 47-51. **(фахове видання України, INSPEC, Index Copernicus)** *Здобувач розробив комп'ютерну модель, провів розрахунки та аналіз даних щодо структури потоку за парними отворами.*

Тези доповідей:

1. Двухструйное пленочное охлаждение: влияние турбулентности и ускорения внешнего потока / А.А. Халатов, И.И. Борисов, **Н.А. Панченко**, Ю.Я. Дашевский, А.С. Коваленко // Тезисы VIII междунар. конф. «Проблемы промышленной теплотехники», Киев, Украина, 8-11 октября 2013 г., — 2с. – Электрон. дан. – К. : ИТТФ НАНУ, 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с этикетки диска.

2. **Панченко Н.А.** Нерівномірність плівкового охолодження плоскої поверхні системою парних отворів / **Н.А. Панченко**, А.А. Халатов // Теоретичні та прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: всеукр. наук.-практ. конф. студ., асп. та мол. вчен., 24-25 квітня 2014 р.: матеріали конф.– К., 2014. – С. 42-43.

3. Влияние турбулентности и ускорения внешнего потока на эффективность пленочного охлаждения за парными отверстиями и отверстиями в сферических углублениях / А.А. Халатов, И.И. Борисов, **Н.А. Панченко**, М.В. Безлюдная, Ю.Я. Дашевский // Научные и практические проблемы использования достижений авиадвигателестроения в наземных ГТУ: LXI Научн.-техн. сессия, 3-5 сент. 2014 г.: тезисы докл. – Пермь, Россия, 2014. – С. 31-37.

4. Неравномерность двухструйного пленочного охлаждения / А.А. Халатов, **Н.А. Панченко**, И.И. Борисов, Ю.Я. Дашевский // XIX- міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2014. — С. 30.

5. Экспериментальное исследование перспективных двухрядных схем пленочного охлаждения / А.А. Халатов, И.И. Борисов, **Н.А. Панченко**, М.В. Безлюдная, Ю.Я. Дашевский // Шестая Российская национальная конференция по теплообмену, 27-31 окт. 2014 г.: тезисы конф. в 3 томах, – М. : Издательский дом МЭИ, 2014. – Т. 1. – С. 197-198.

6. Эффективность пленочного охлаждения за парными отверстиями и отверстиями в сферических углублениях / А.А. Халатов, М.В. Безлюдная, **Н.А. Панченко**, И.И. Борисов, Ю.Я. Дашевский // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: всерос. школы-конф. с междунар. участием, 20-23 ноября 2014 г.: тезисы докл. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2014. — С. 167-168.

7. Маліновська А.М. Експериментальне дослідження системи охолодження поверхні типу "парні отвори"/ А.М. Маліновська, **Н.А. Панченко**, Н.Л. Лебедь // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: XIII між нар. наук.-практ.

конф. асп., магістр. і студ., 21-24 квітня 2015р.: матеріали конф. у 2 т., — К.: НТУУ «КПІ», 2015. — Т.1. — С. 71.

8. **Панченко Н.А.** Експериментальне дослідження плівкового охолодження плоскої поверхні системою парних отворів / **Н.А. Панченко**, А.М. Маліновська // Теоретичні та прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: всеукр. наук.-практ. конф. студ., асп. та мол. вчен., 21-23 травня 2015 р.: матеріали конф.– К., 2014. – С. 111-114.

9. **Панченко Н.А.** Компьютерное моделирование пленочного охлаждения при подаче охладителя через парные отверстия / **Н.А. Панченко** // XX-Міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. — Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2015. — С. 32.

10. Эффективность двух перспективных схем пленочного охлаждения/ А.А. Халатов, **Н.А. Панченко**, М.В. Безлюдная, И.И. Борисов, Ю.Я. Дашевский // Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: пятая международная конференции: тезисы докладов. — 19-22 октября 2015 р. Казань, Россия. — Санкт-Петербург: Свое издательство, 2015. — С. 104-105.

11. Эффективность двух перспективных схем пленочного охлаждения/ А.А. Халатов, **Н.А. Панченко**, М.В. Безлюдная, И.И. Борисов, Ю.Я. Дашевский // Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: пятая международная конференции: труды конференции. — Казань: КНИТУ-КАИ, — 2015. — С. 467-477.

12. Халатов А.А. Компьютерное моделирование пленочного охлаждения за парными отверстиями / А.А. Халатов, **Н.А. Панченко** // Проблемы промышленной теплотехники: IX междунар. конф., 20-23 окт. 2015 г.: тезисы конф. – К.: Промышленная теплотехника, – Т.37, №7.– 2015. – С. 30-31.

АНОТАЦІЯ

Панченко Н.А. Ефективність плівкового охолодження плоскої поверхні при подачі охолоджувача через парні отвори. — Рукопис.

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 експериментальному і теоретичному дослідженню плівкового охолодження плоскої поверхні з подачею охолоджувача через парні отвори на вході. Вперше отримано рівняння для низькотурбулентного і безградієнтного обтікання, вивчено вплив зовнішньої турбулентності і прискорення потоку, визначені відносні функції, що характеризують вплив цих факторів.

Результати експериментального дослідження плівкового охолодження плоскої поверхні через парні отвори показали, що при малих (m = 0,5) і помірних (m = 1,0) значеннях параметра вдуву ефективність плівкового охолодження поверхні на 20-25% вище, ніж для стандартної дворядної системи циліндричних отворів і відповідає їй при m = 1,5 і більше. За інших рівних умов ступінь нерівномірності ефективності плівкового охолодження для схеми парних отворів менше, ніж для традиційної схеми з двома рядами отворів.

При CFD моделюванні складної тривимірної структури потоку і теплообміну був використаний комерційний пакет ANSYS CFX 14. Протестовані 6 моделей турбулентності. Моделі *k-ε* групи представлені стандартною *k-ε* моделлю і *RNG k-ε* моделлю, моделі *k-ω* групи — стандартною *k-ω* моделлю та *SST* моделлю Ментера, а також двома моделями напруг Рейнольдса (*RSM*) — *SSG* та *LRR*. При низькому параметрі вдуву (m = 0,5) розглянуті в роботі моделі турбулентності задовільно узгоджуються з отриманими експериментальними даними; при цьому кращі результати демонструє *k-ε* модель турбулентності. При m=1,0 та m=1,5 всі моделі показують завищені результати на ділянці x/d<10…20.

Результати комп'ютерного моделювання та поверхневої візуалізації показали, що основними факторами більш високої ефективності плівкового охолодження при малих (m = 0,5) і помірних (m = 1,0) значеннях параметра вдуву є перетворення «ниркового» вихору і формування антиниркової вихрової структури з поперечним розтіканням охолоджувача біля стінки, що перешкоджає надходженню зовнішнього потоку до охолоджуваної поверхні.

На основі комп'ютерного моделювання показано, що при заданих значеннях кутів β_1 і β_2 поперечна відстань Δ між отворами першого і другого ряду, має значний вплив на ефективність плівкового охолодження, яка змінюється по кривій з максимумом.

Наведено відомості про впровадження отриманих результатів і сформульовані завдання подальшого дослідження.

Ключові слова: плівкове охолодження, ефективність плівкового охолодження, парні отвори, комп'ютерне моделювання.

АННОТАЦИЯ

Панченко Н.А. Эффективность пленочного охлаждения плоской поверхности при подаче охладителя через парные отверстия. — Рукопись.

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 экспериментальному и теоретическому исследованию пленочного охлаждения плоской поверхности с подачей охладителя через парные отверстия на входе. Впервые получено уравнение для низкотурбулентного и безградиентного обтекания, изучено влияние внешней турбулентности и ускорения потока, определены относительные функции, характеризующие влияние этих факторов.

Результаты экспериментального исследования пленочного охлаждения плоской пластины через парные отверстия на входе показали, что при малых (m=0,5) и умеренных (m=1,0) значениях параметра вдува эффективность пленочного охлаждения пластины в среднем на 20-25 % выше, чем для стандартной двухрядной системы цилиндрических отверстий и соответствует ей при m = 1,5 и более. При прочих равных условиях степень неравномерности эффективности пленочного охлаждения для схемы парных отверстий меньше, чем для традиционной двухрядной схемы отверстий.

При CFD моделировании сложной трехмерной структуры потока и теплообмена был использован коммерческий пакет ANSYS CFX 14. Протестировано 6 моделей турбулентности. Модели *k-ε* группы представлены стандартной *k-ε* моделью и *RNG k-ε* моделью, модели *k-ω* группы — стандартной *k-ω* моделью и *SST* моделью Ментера, а также двумя моделями напряжений Рейнольдса (*RSM*) — *SSG* и *LRR*. При низком параметре вдува (m=0,5) рассмотренные в работе модели турбулентности удовлетворительно согласуются с полученными экспериментальными данными; при этом лучшие результаты демонстрирует *k-ε* модель турбулентности. При m=1,0 и m=1,5 все модели показывают завышенные результаты на участке x/d<10…20.

Результаты компьютерного моделирования и поверхностной визуализации показали, что основными факторами более высокой эффективности пленочного охлаждения при малых (m=0,5) и умеренных (m=1,0) значениях параметра вдува являются преобразование «почечного» вихря и формирование антипочечной вихревой структуры с поперечным растеканием охладителя около стенки, которая препятствует поступлению внешнего потока к охлаждаемой стенке.

На основе компьютерного моделирования показано, что при заданных значениях углов β_1 и β_2 поперечное расстояние Δ между отверстиями первого и второго ряда, оказывает значительное влияние на эффективность пленочного охлаждения, которая изменяется по кривой с максимумом.

Приведены сведения о внедрении полученных результатов и сформулированы задачи дальнейшего исследования.

Ключевые слова: пленочное охлаждение, эффективность пленочного охлаждения, парные отверстия, компьютерное моделирование.

ABSTRACT

Panchenko N.A. The film cooling efficiency over the flat plate at the coolant supply through the double jet holes. — Manuscript.

The thesis is submitted for the candidate degree of engineering sciences relating to the speciality 05.14.06 — Engineering Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering. — Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine. — Kyiv, 2016

The thesis is associated with the experimental and theoretical study of the flat plate film cooling fundamentals with double jet holes at the inlet. The new correlation is given for the free-stream turbulent flow with low external turbulence, the effects of external turbulence and flow acceleration were studied and relative correlations describing the influence of these factors were obtained.

The experimental results of the film cooling efficiency obtained over a flat plate with the double jet hole configuration at the inlet have shown that at low (m=0,5) and medium (m=1,0) blowing ratio the cooling efficiency of this configuration is greater of the traditional scheme of two-array inclined cylindrical holes, however corresponds it at m=1,5 and more. Under identical equal conditions the rate of non-uniformity of the film cooling efficiency for the scheme of double jet holes is lower compared to the traditional cooling scheme with dual row of holes.

In theoretical part, three-dimensional numerical fluid flow and heat transfer analysis was performed using commercial CFD code ANSYS CFX 14. All together 6 *RANS* turbulence models were tested; where the models of *k-ε* group were presented by the standard *k-ε* model and *RNG k-ε* model, while *k-ω*group models – by the standard *k-ω* model and Menter *SST* model. Also, two Reynolds Stress models (*RSM*) were tested, namely *SSG* and *LRR* models. At low (m = 0,5) blowing ratio comparison has shown a good agreement of experimental data obtained with calculated results; while using of standard *k-ε* turbulence model showed best results. At m=1,0 and m=1,5 all mathematical models tested overestimate experimental results in the area x/d<10…20.

The results of the computer simulation and surface streamlines visualization have shown that the main factors of the greater film cooling efficiency at low (m=0,5) and medium (m=1,0) blowing ratio are transformation of the kidney vortex structure and formation of the anti-kidney vortex pair with a cooling air spreading in the spanwise direction, which prevents penetration of the external flow to the cooled wall.

The information regarding an application of the results obtained in this study is given, the primary directions of further investigations are also identified.

Keywords: film cooling, film cooling efficiency, double jet holes, numerical simulation.