

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу *Панченко Надії Анатоліївни* «Ефективність плівкового охолодження плоскої поверхні при подачі охолоджувача через парні отвори», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 — технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Дисертаційною роботою є рукопис, що містить 151 сторінку тексту, у тому числі 67 рисунків та 12 таблиць, і складається зі вступу, 3 розділів, висновків, списку літератури (118 найменувань), 5 додатків.

1. Актуальність дисертаційної роботи

Підвищення температури газу перед турбіною є головним напрямком термодинамічного вдосконалення ГТД та ГТУ різного призначення. У сучасних потужних енергетичних турбінах вхідна температура газу становить 1500...1600°C та 1750...1800°C – в авіаційних ГТД військового призначення. Оскільки температура газу обмежується допустимою температурою для матеріалу лопаток, яка для кращих сплавів становить сьогодні лише 1000–1100 °С, то в сучасних лопатках, поряд з теплозахисними покриттями, широко застосовуються внутрішнє і зовнішнє (плівкове) охолодження.

Плівкове (завісне) охолодження є основним методом зовнішнього охолодження лопаток високотемпературних газових турбін, воно збереже свою конкурентоспроможність у газових турбінах до температури газу 1800...1850°C. Однак традиційні схеми плівкового охолодження у вигляді системи одно- дво- і багаторядних дискретних похилих отворів характеризуються рядом недоліків. Основний з них - виникнення системи вторинних вихрових структур, основними

з яких є так звані «ниркові» вихори, які призводять до зниження ефективності плівкового охолодження.

В даний час в провідних світових центрах активно вивчаються перспективні конфігурації плівкового охолодження. Серед них — отвори дифузорного і конфузорно-дифузорного типів, консольні отвори, отвори у траншеї і в поглибленнях різної форми, схеми з додатковими бічними отворами, парні отвори, розташовані під складним кутом по відношенню до основного потоку. У зв'язку з цим, пошук і дослідження нових альтернативних систем плівкового охолодження зі зниженою витратою охолоджувача і високою теплофізичною ефективністю являє собою актуальну науково-технічну проблему.

Основною вимогою для нових технічних рішень є рівномірність покриття поверхні плівкою охолоджувача при мінімальному підвищенні його витрати та технологічність виробництва. В роботі виконано дослідження перспективної схеми плівкового охолодження з подачею охолоджувача через парні отвори, що формує «антиниркову» вихрову структуру. Дисертація є завершеною дослідницькою роботою, яку виконано в НТУУ «КПІ» на кафедрі фізики енергетичних систем згідно з тематичними напрямками наукових досліджень і науково-технічних розробок та в ІТТФ НАНУ в відділі високотемпературної термогазодинаміки згідно з держбюджетними НДР та договірними науково-технічними роботами.

2. Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є 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 вдування, прискорення і зовнішньої турбулентності потоку.

В дисертації вдало поєднуються експериментальні і теоретичні методи дослідження, що дало змогу вирішити наступні задачі:

— Створено робочу ділянку і виконано дослідження ефективності плівкового охолодження плоскої поверхні при безградієнтному, низькотурбулентному ($Tu \approx 1 \%$) потоці повітря в діапазоні зміни параметра вдуву від 0,5 до 3,0.

— Вивчено вплив зовнішньої турбулентності та прискорення потоку.

— Отримані узагальнюючі залежності, які характеризують вплив параметра вдуву, зовнішньої турбулентності та прискорення потоку на ефективність плівкового охолодження.

— За допомогою комп'ютерного моделювання та поверхневої візуалізації потоку проаналізовано фізичну структуру течії та теплообміну у розглянутій схемі плівкового охолодження, визначено адекватні моделі турбулентності.

— Вивчено оптимальні геометричні параметри схеми парних отворів, що забезпечують максимальну ефективність плівкового охолодження.

3. Наукова новизна і значимість отриманих результатів

Нові наукові результати, отримані в області технічної теплофізики, полягають в наступному:

— Вперше експериментально і теоретично досліджена схема плівкового охолодження на плоскій пластині з подачею охолоджувача через парні отвори при зовнішній турбулентності і прискоренні потоку.

— Отримані наукові дані, які дозволили обґрунтувати новий фізичний механізм підвищення ефективності плівкового охолодження та виявити пов'язані з ним закономірності.

— На основі експериментальних даних отримано узагальнюючу (базову) залежність, що характеризує середню ефективність плівкового охолодження за новою схемою.

— Вперше досліджено вплив зовнішньої турбулентності потоку та градієнту тиску на середню ефективність плівкового охолодження за рядами парних похилих отворів і отримані відносні функції для його урахування.

— Вперше отримано рівняння для оптимального значення відстані між отворами, що забезпечує максимальну ефективність охолодження за схемою, що розглядалась.

4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються

Обґрунтування достовірності отриманих в роботі результатів забезпечена тестовими випробуваннями експериментального стенду і системи вимірювань, використанням апробованих методик проведення експериментів і методів узагальнення експериментальних даних, аналізом похибки вимірювань. Достовірність комп'ютерного моделювання забезпечена порівнянням результатів комп'ютерного моделювання та отриманих в роботі експериментальних даних, використанням при аналізі фізичної структури потоку найбільш адекватної моделі турбулентності.

5. Значення отриманих в дисертаційній роботі прикладних результатів

Результати роботи можуть бути використані при розрахунках систем охолодження лопаток газових турбін. Рекомендації з використання моделей турбулентності, що дані в роботі, можуть використовуватись при комп'ютерному моделюванні систем плівкового охолодження лопаток газових турбін з подачею охолоджувача через парні отвори. Результати дисертаційної роботи отримали використання в практиці газотурбобудування України, а також в навчальному процесі Фізико-технічного інституту НТУУ «КПІ».

6. Повнота викладення в опублікованих роботах наукових і прикладних результатів дисертації, що захищається.

Основні наукові та прикладні результати дисертації, що захищається, апробовані на 14 конференціях в тому числі за кордоном.

Основні результати дисертації опубліковано у 21 науковій праці, у тому числі: у 6 статтях в наукових фахових виданнях України, 3 статтях у виданнях іноземних держав. З опублікованих статей 7 представлені у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз даних. 12 тез доповідей опубліковано у збірках матеріалів конференцій. В опублікованих роботах достатньо повно представлені всі основні результати дисертації.

Результати виконаних досліджень удостоєні відзнаки Президії НАН України на конкурсі наукових робіт студентів та молодих вчених НАН України.

7. Повнота і стиль викладення матеріалу в дисертації і авторефераті, ступінь відповідності їх паспорту спеціальності.

Автореферат написано докладно, добре ілюстровано і він відповідає змісту дисертації. Всі основні положення і висновки, що містяться в дисертації відображені в авторефераті.

Повнота і стиль викладення результатів експериментальних і теоретичних досліджень і висновків відповідають сучасним вимогам до наукових публікацій.

Дисертація і автореферат повністю відповідають паспорту спеціальності 05.14.06 — технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

8. Основні зауваження і недоліки дисертаційної роботи, що захищається. Оцінка в цілому її змісту і завершеності.

До основних недоліків дисертаційної роботи потрібно віднести наступне:

1. Значення інтенсивності турбулентності в умовах роботи різних ГТД змінюються в досить широкому діапазоні. У даній роботі дослідження

впливу зовнішньої турбулентності обмежується тільки одним значенням її інтенсивності.

2. Зазвичай високий рівень турбулентності зовнішнього потоку призводить до суттєвого зниження захисних властивостей плівки охолоджувача внаслідок інтенсивного розмивання. У даній роботі збільшення інтенсивності турбулентності потоку не впливає на ефективність плівкового охолодження. Варто було б дати більш детальне пояснення цього ефекту.
3. Не вказана технологія виконання отворів під складним кутом в робочій ділянці. Як контролювалася ідентичність кутів β_1 та β_2 .
4. Як відомо, у сучасних потужних енергетичних турбінах вхідна температура газу становить 1500...1600°C. У роботі не вказано, як результати дослідження можуть бути використані для реальних температур, оскільки температури при яких проводилися експерименти не відповідають робочим умовам лопаток газових турбін.
5. В дисертації бракує інформації про постановку граничних умов при числовому моделюванні досліджуваного процесу. Зокрема, не вказано який розподіл швидкості основного потоку прийнято на вхідній границі та який підхід застосовувався до визначення характеристик турбулентності поблизу стінок за умов $y^+ < 1.5$.

Наведені вище зауваження не знижують загальну наукову і практичну цінність виконаної роботи.

9. Висновок про відповідність дисертації вимогам «Положення про порядок присудження наукових ступенів і присвоєння вчених звань»

Дисертація Панченко Н.А., є завершеною науковою роботою, в якій отримані нові наукові результати в області плівкового охолодження. За обсягом

представленого матеріалу, глибиною пророблення поставлених задач і методичному рівню їх вирішення, за науковою і практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 9, 11, 12, 13 «Положення про порядок присудження наукових ступенів і присвоєння вчених звань», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567, а її автор *Панченко Надія Анатоліївна* заслуговує присудження вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 — Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Професор кафедри гідрогазових систем
Національного авіаційного університету,
доктор технічних наук, професор



Мочалін Є.В.
свідчу
Вчений секретар
Національного авіаційного університету
О. Варашко

Є.В. Мочалін