

*М. А. ДАНИЛОВ, Т. В. ДОНИК*

## ВПЛИВ БЛОКУВАННЯ ОТВОРІВ ВИДУВУ ОХОЛОДЖУВАЧА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

Робота присвячена комп'ютерному моделюванню плівкового охолодження плоскої пластини з подачею вторинного потоку в ряд похилих отворів при їх частковому блокуванні. Розрахунки виконані в комерційному програмному комплексі ANSYS CFX 2019 R2 при зміні параметру вдуву від 0,5 до 1,5, що були підібрані відповідно до реальних умов, з використанням SST-моделі турбулентності. При збільшенні параметру блокування від 0,5 до 1,5 ефективність плівкового охолодження знижується на 3,1 %, 6,7 %, 10,6 % відповідно, у порівнянні з традиційною схемою без блокування. Зі збільшенням параметру вдуву зберігається значна нерівномірність ефективності плівкового охолодження по всій довжині пластини, з яскраво вираженими максимумами по осі отворів вдуву охолоджувача та мінімумами в області між отворами. З іншого боку зберігається явно виражена симетричність на кожній конфігурації пластини. Як показав аналіз розподілу локальної ефективності плівкового охолодження по площині пластини для кожної конфігурації блокування, ефективність плівкового охолодження рівномірно знижується зі збільшенням параметру вдуву.

**Ключові слова:** блокування отворів, ефективність плівкового охолодження, параметр блокування, комп'ютерне моделювання.

*M. DANYLOV, T. DONYK*

## THE EFFECT OF BLOCKING THE COOLING AIR VENTS ON THE EFFICIENCY OF FILM COOLING

The article is devoted to the computer simulation of film cooling of a flat plate with the supply of a secondary flow in a series of inclined holes with their partial blocking. Calculations were performed in the commercial ANSYS CFX 2019 R2 software complex with a change in the injection parameter from 0.5 to 1.5, which were selected according to real conditions, using the SST turbulence model. When the blocking parameter increases from 0.5 to 1.5, the film cooling efficiency decreases by 3.1 %, 6.7 %, and 10.6 %, respectively, compared to the traditional scheme without blocking. As the blow-in parameter increases, significant non-uniformity of film cooling efficiency remains over the entire length of the plate, with pronounced maxima along the axis of the cooler blow holes and minima in the region between the holes. On the other hand, a pronounced symmetry is preserved on each configuration of the plate. As the analysis of the distribution of the local effectiveness of the film cooling on the plane of the plate for each blocking configuration showed, the effectiveness of the film cooling uniformly decreases with an increase in the blowing parameter.

**Key words:** hole blocking, film cooling efficiency, blocking parameter, computer simulation.

### Вступ

В теперішній час, сучасні та потужні енергетичні газотурбінні установки (надалі ГТУ) мають дуже високу температуру газу на вході 1750 °С – 1800 °С. Натомість, жаростійкі матеріали, що використовують при будівництві лопаток ГТУ, витримують температури 1000 ° – 1100 °С. Саме через це виникає питання, щодо ефективного охолодження контактних поверхонь, а саме лопаток ГТУ, які повинні витримувати сучасний температурний потік з камери згоряння.

В сучасних стаціонарних ГТУ в якості охолоджувача зазвичай використовують повітря, яке забирається з компресора та одразу після пропускання через деталь або викидається в проточну частину турбіни (відкрите охолодження), або повертається в компресор (напівзамкнене охолодження) [1]. Одним з найпоширеніших методів подачі охолоджувача є плівкове охолодження, воно характеризується подачею охолоджуючого повітря з внутрішньої порожнини лопатки, що подається на зовнішню поверхню через отвори малого діаметру.

Під час роботи ГТУ високотемпературний потік, що виходить з камери згоряння з наявними продуктами горіння, взаємодіє з поверхнею лопатки, що, в свою чергу, призводить до налипання

таких осадів, як  $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ , які потрапляють на отвори вдуву охолоджувача, утворюючи часткове блокування (рис. 1), яке неодмінно впливає на ефективність плівкового охолодження. Таким чином виникає значна зацікавленість в кореляції ефективності плівкового охолодження відносно ступеня блокування отворів. Проведена наукова праця виходить за межі існуючих [2] оскільки, має більш комплексну геометричну модель та розширює розуміння актуальної теми.



Рис. 1 – Блокування отворів в реальних умовах у повздовжньому розрізі [2]

Досконалість систем плівкового охолодження часто оцінюють по адіабатичній ефективності (далі ефективність плівкового охолодження), яка визначається за формулою [3]:

$$\eta = \frac{T_{a\infty}^* - T_{\infty}^*}{T_2^* - T_{\infty}^*}, \quad (1)$$

де  $T_{\infty}^*$  – повна температура основного потоку,

© М. А. Данилов, Т. В. Доник, 2023

без врахування охолоджувача;

$T_{\infty}^*$  – адиабатична температура поверхні, що захищається;

$T_2^*$  – повна температура охолоджувача на виході.

Таким чином, проблема блокування отворів подачі охолоджувача в лопатках ГТУ є актуальною проблемою, яка потребує детального аналізу.

### Мета роботи

Метою роботи є дослідження й порівняння ефективності плівкового охолодження при подачі охолоджувача в традиційну конфігурацію з рядом похилих отворів без блокування та з частковим блокуванням отворів.

### Комп'ютерне моделювання

На базі програмного комплексу *ANSYS CFX* 2019 R2 було виконане комп'ютерне моделювання плівкового охолодження. Було введено відношення, що характеризує ступінь блокування отворів, а саме

$$h/d,$$

де  $h$  – поперечний розмір блокування отворів подачі охолоджувача;

$d$  – діаметр отвору вдуву.

Побудовано чотири схеми геометрії, а саме: традиційна конфігурація без блокування, що характеризується  $h/d = 0$ , конфігурація з частковим блокуванням –  $h/d = 0,5; 1,0; 1,5$  (рис. 2).

Геометричні розміри розрахункової моделі обрані близькими до розмірів характерних реальних систем плівкового охолодження лопаток газових турбін. Діаметр отвору  $d = 0,8$  мм, поперечний крок заглиблень  $t = 2,4$  мм ( $t/d = 3,0$ ), кут нахилу отворів до поверхні  $\alpha = 30^\circ$ , діапазон параметру  $h$  змінюється з кроком,  $h = 0,4 - 1,2$  мм.

Геометрична 3D-модель плівкового охолодження плоскої поверхні була виконана в модулі Geometry пакету *ANSYS*, яка представляє собою ряд похилих отворів з різним ступенем блокування, до яких охолоджувач подається із зовнішнього об'єму (пенуми), зображеного на рис. 3. Для розрахунків була використана неструктурована комбінована розрахункова сітка, яка побудована у генераторі *ANSYS Mesh* комбінацією тетраедричних елементів в області основного потоку, з призматичними елементами в областях згущення сітки поблизу твердих стінок, які є обмеженням для каналів розрахункової моделі.

Число вузлів розрахункової сітки в загальному випадку залежить від розмірів моделі і числа отворів плівкового охолодження і для дослідженої моделі без блокування складає 434 тисяч вузлів та 1,1 млн. елементів (рис. 4).

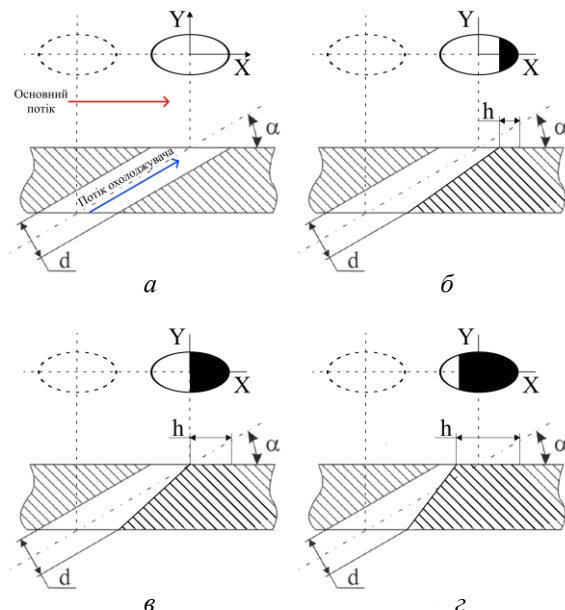


Рис. 2 – Геометрична модель в зоні вдуву охолоджувача на плоску поверхню при частковому блокуванні:  
а –  $h/d = 0$ ; б –  $h/d = 0,5$ ; в –  $h/d = 1,0$ ; з –  $h/d = 1,5$

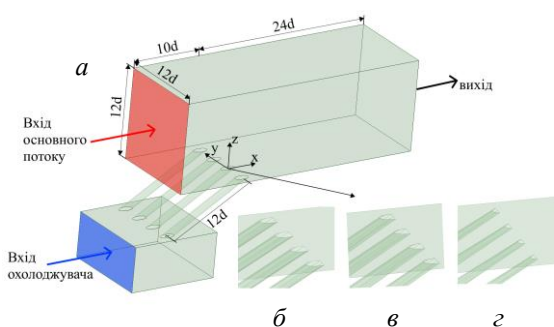


Рис. 3 – Геометрія моделі плівкового охолодження плоскої поверхні при вдуві охолоджувача через ряд отворів при частковому блокуванні:  
а –  $h/d = 0$ ; б –  $h/d = 0,5$ ; в –  $h/d = 1,0$ ; з –  $h/d = 1,5$

Граничні умови на вході і виході розрахункової області відповідають значенням параметра вдуву близьким до  $m = 0,5; 1,0; 1,5$ .

Швидкість основного потоку становить 37 м/с, температура – 20 °С. Температура вторинного потоку – 80 °С. Зворотнє направлення теплового потоку не впливає на кінцеві результати, але в границі незначної різниці температур [4]. Інтенсивність турбулентності основного потоку приймалася рівною 1 %.

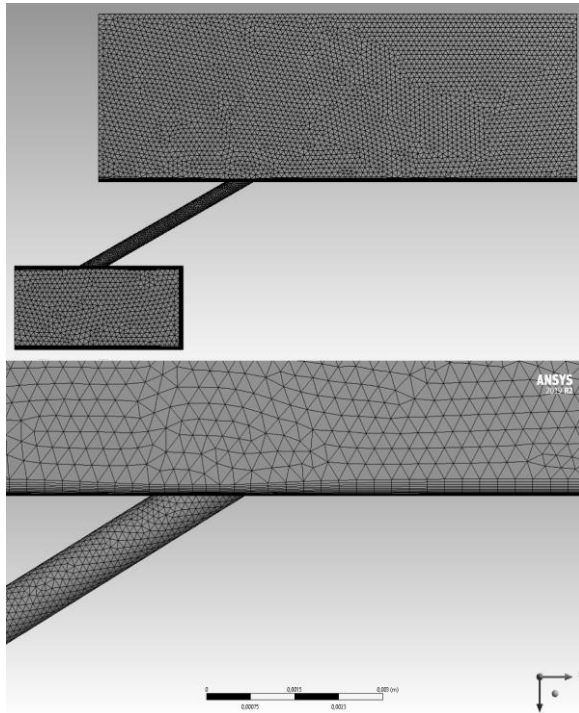


Рис. 4 – Неструктуровані геометричні сітки для CFD моделювання у поперечному напрямку та в околі ділянки поверхні вдуву охолоджувача (без блокування)

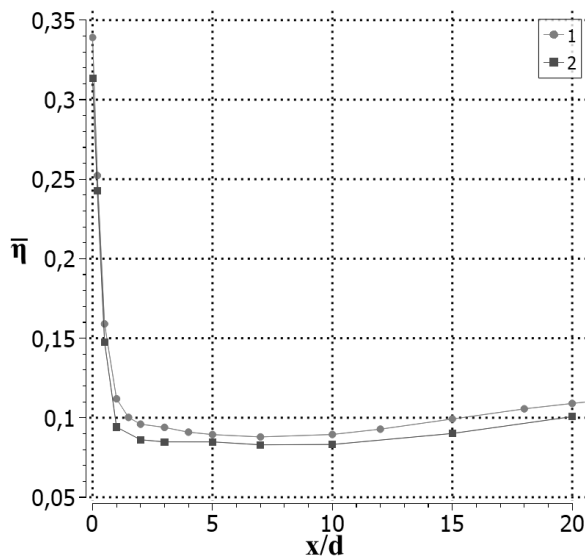


Рис. 5 – Порівняння залежності середньої в поперечному напрямку адіабатної ефективності плівкового охолодження по довжині пластини вибраної сітки з розрахунковими даними для параметру вдуву  $m = 1,0$ : 1 – розрахунок з використанням сітки 1,1 млн. елементів; 2 – розрахунок ІТТФ НАН України

Тверді границі розрахункової області були задані для адіабатної стінки ( $\delta Q = 0$ ). На бічних поверхнях розрахункової моделі були задані умови симетрії.

Дослідження виконувалися з використанням осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса (RANS) і для замкнення системи рівнянь використовується SST модель турбулентності, яка показує достовірні результати при розрахунку плівкового охолодження [5].

## Результати моделювання та їх аналіз

### Верифікація результатів

Було проведено верифікацію результатів дослідження з даними розрахунків, що були проведені в Інституті технічної теплофізики НАН України [3] для моделі традиційного випуску охолоджувача через ряд похилих отворів при параметрі вдуву  $m = 1,0$  (рис. 5).

Для повного аналізу результуючого порівняльного графіку (рис. 5), було проведено порівняльну характеристику відхилення результатів ефективності плівкового охолодження з отриманими в результаті комп'ютерного моделювання.

Результати показали, що відхилення від результатів [3] становило 9,68 %, що є допустимим відхиленням при комп'ютерному моделюванні.

Отже, SST модель турбулентності достатньо точно описує ефективність плівкового охолодження для традиційної конфігурації без блокування ( $h/d = 0$ ).

Для оцінювання похибки розрахованих даних було використано формулу:

$$\varepsilon = \frac{|\bar{\eta}_1 - \bar{\eta}_2|}{\bar{\eta}_1} \cdot 100 \% , \quad (2)$$

де  $\bar{\eta}_1$  – експериментальне/розраховане значення ІТТФ середньої ефективності плівкового охолодження поперечної лінії каналу;

$\bar{\eta}_2$  – розраховане значення середньої ефективності плівкового охолодження поперечної лінії.

### Ізолінії ефективності плівкового охолодження

В цьому розділі наведені ізолінії розподілу ефективності плівкового охолодження на плоскій поверхні для всіх досліджуваних конфігурацій з блокуванням та без, відповідно до параметру вдуву  $m = 0,5$  (рис. 6);  $m = 1,0$  (рис. 7);  $m = 1,5$  (рис. 8).

Аналізуючи наведені ілюстрації, ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження, можна зазначити, що зі збільшення параметру вдуву  $m$ , ефективність плівкового охолодження спадає.

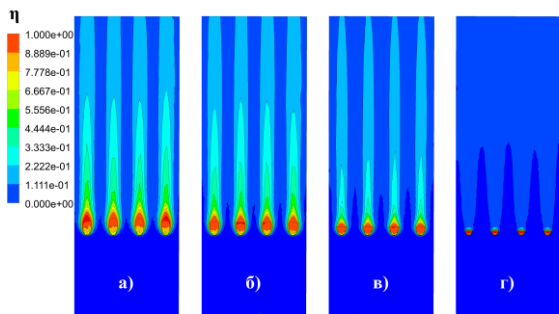


Рис. 6 – Ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження по параметру вдуву  $m = 0,5$  для різних конфігурацій блокування отворів:  $a - h/d = 0$ ;  $б - h/d = 0,5$ ;  $в - h/d = 1,0$ ;  $г - h/d = 1,5$

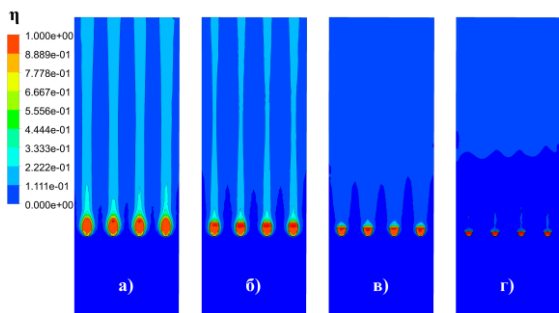


Рис. 7 – Ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження по параметру вдуву  $m = 1,0$  для різних конфігурацій блокування отворів:  $a - h/d = 0$ ;  $б - h/d = 0,5$ ;  $в - h/d = 1,0$ ;  $г - h/d = 1,5$

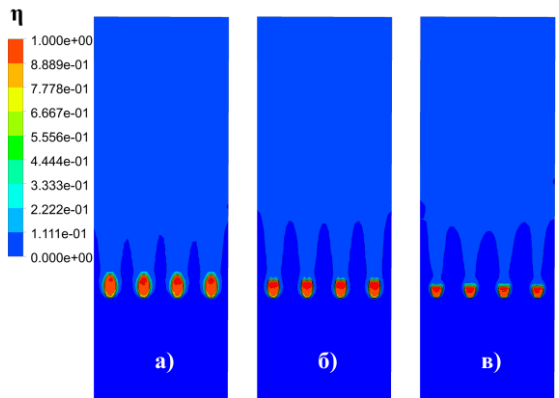


Рис. 8 – Ізолінії локальної ефективності плівкового охолодження по параметру вдуву  $m = 1,5$  для різних конфігурацій блокування отворів:  $a - h/d = 0$ ;  $б - h/d = 0,5$ ;  $в - h/d = 1,0$

Збільшення параметру  $h/d$  блокування отворів так само негативно впливає на локальну ефективність плівкового охолодження, тому що охолоджувач виходить під більшим кутом і виникає відрив потоку, через це відбувається змішування охолоджувача і основного потоку, що негативно впливає на ефективність.

Також необхідно відзначити виражену нерівномірність розподілення потоку охолоджувача по поверхні пластини, з яскраво вираженими максимумами на осі розташування отворів виводу охолоджувача вздовж всієї пластини та мінімумами на осі між отворами, що вкотре нам доводить нерівномірність утворення плівки охолоджувача.

При параметрі вдуву  $m = 1,5$  нерівномірність не прослідковується через значне зниження локальної ефективності плівкового охолодження, що спричинено повним відривом потоку охолоджувача та його перемішування з основним потоком.

### Порівняння усередненої по ширині пластини ефективності плівкового охолодження

Для визначення усередненої по ширині пластини ефективності плівкового охолодження використовується залежність (3):

$$\bar{\eta} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{n-1} (\eta_i + \eta_{i+1}), \quad (3)$$

де  $n$  – кількість локальних (місцевих) точок ефективності плівкового охолодження в поперечному напрямку, прийнятих для усереднення.

На рис. 9 представлені середня ефективність плівкового охолодження по ширині пластини для  $h/d = 0 - 1,0$  при параметрі вдуву  $m = 0,5$  на ділянці  $0 \leq x/d \leq 20$ .

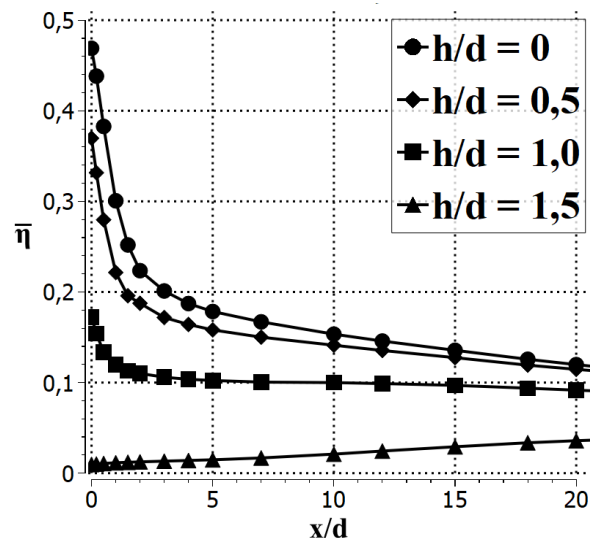


Рис. 9 – Усереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження з впливом блокування при  $m = 0,5$

Як видно з рис. 9, на відносно малому параметрі блокування ( $h/d = 0,5$ ) спостерігається незначне погіршення ефективності плівкового охолодження, яке складає до 17%. Однак при збіль-

шені параметру блокування, ( $h/d = 1,0$  та  $h/d = 1,5$ ) видно значний спад ефективності плівкового охолодження, а саме на початковій ділянці  $0 \leq x/d \leq 2$ . Такий характер залежності середньої ефективності плівкового охолодження вздовж пла-

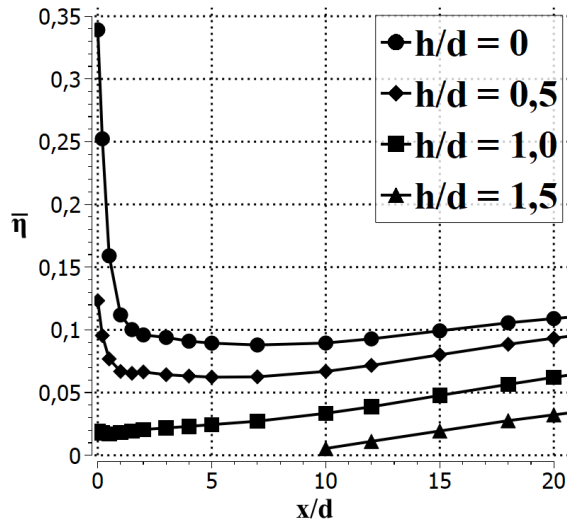


Рис. 10 – Усереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження, з впливом блокування отворів при  $m = 1,0$

стини спричинений відривом потоку на початковій ділянці після видуву охолоджувача.

На рис. 10 та рис. 11 представлені залежності середньої ефективності плівкового охолодження по ширині для  $m = 1,0$  та 1,5.

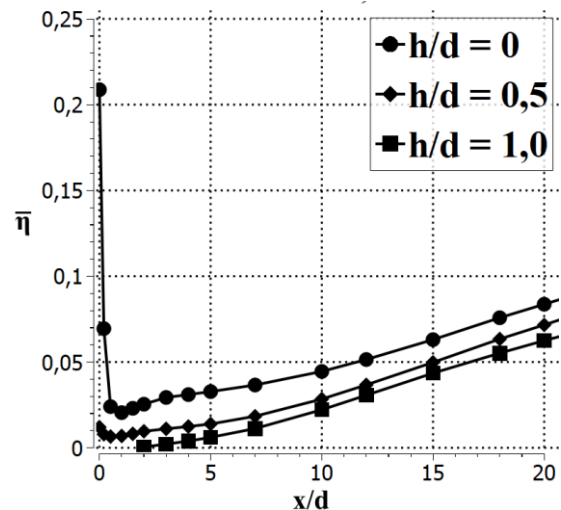


Рис. 11 – Усереднена по ширині пластини ефективність плівкового охолодження, з впливом блокування при  $m = 1,5$

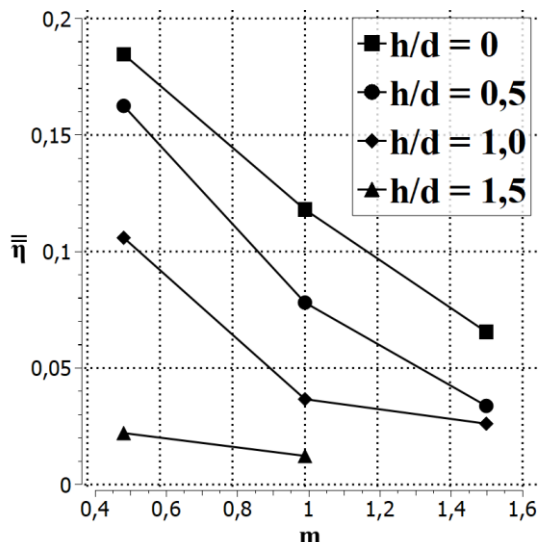


Рис. 12 – Залежність усередненої по всій площі ефективності плівкового охолодження за різних значень параметру вдуву  $m$

На початковій ділянці ( $0 \leq x/d \leq 2$ ) відбувається різке зниження ефективності, що пояснюється відривом струменя потоку охолоджувача, який не встигає притиснутися до поверхні, а зразу переміщується з основним потоком, по причині більшого кута видуву та більшу швидкість, через звуження заблокованого отвору видуву.

#### Порівняння усередненої по площі пластини ефективності плівкового охолодження

Далі представлено порівняння результатів усередненої по усій площі досліджуваної пластини ефективності плівкового охолодження, яке визначалося із залежності (4):

$$\bar{\eta} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{\eta}_k, \quad (4)$$

де  $\bar{\eta}_k$  – усереднена ефективність плівкового охолодження по бічній поверхні за номером поперечного перерізу  $k$ ;

$k$  – кількість поперечних перерізів взятих вздовж довжини каналу.

На рис. 12 зображені залежності усередненої по всій поверхні ефективності плівкового охолодження для всіх конфігурацій блокування отворів відносно різних параметрів вдуву. Як видно з графіку, при збільшенні параметру вдуву, та при збільшенні параметру блокування ефективність плівкового охолодження зменшується у відсотковому значенні на 3,1 % ( $h/d = 0,5$ ), 6,7 % ( $h/d = 1,0$ ), 10,6 % ( $h/d = 1,5$ ).

Також спостерігається тенденція зниження ефективності при збільшенні параметру вдуву у кожній з конфігурацій блокування, що спричинено відривом потоку на початковій ділянці й переміщенням його з основним потоком.

### Висновки

Як показали результати дослідження зі збільшенням параметру блокування  $h/d$ , ми спостерігаємо стрімке погіршення ефективності плівкового охолодження поверхні за отворами видува охолоджувача, що пов'язано з відривом потоку охолоджувача на початковій ділянці поверхні. Це також є результатом того, що при зростанні блокування охолоджувач виходить з отворів під більшим кутом та струмінь охолоджувача змішується з основним потоком, що знижує ефективність плівкового охолодження.

Тенденція зменшення ефективності плівкового охолодження по усій площі пластини для всіх параметрів вдуву у відсотковому значенні складала: 3,1% ( $h/d = 0,5$ ), 6,7% ( $h/d = 1,0$ ), 10,6% ( $h/d = 1,5$ ).

Нерівномірність розподілу плівки охолоджувача зберігається разом зі зростанням параметру вдуву, що пов'язано з геометрією отворів.

### Список літератури

1. Кравченко. И. Ф. Исследование вариантов воздухо-воздушного теплообменника для охлаждения турбины газотурбинного двигателя / И. Ф. Кравченко, В. А. Шкабура, А. В. Еланский // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2013. – № 4. – С. 78–82. – ISSN 1727-7337.
2. Chen, X. Effect of Partial Blockage on Flow and Heat Transfer of Film Cooling with Cylindrical and Fan-Shaped Holes / X. Chen, Y. Wang, Y. Long, S. Weng // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2021. – Vol. 164. – No. paper 106866. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106866>.
3. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил : моногр. : Т. 10: Перспективные схемы пленочного охлаждения / А. А. Халатов, И. И. Бори-

сов, Ю. Я. Дашевский, С. Б. Резник. – Киев : НТУУ «КПИ» : «Политехника», 2016. – 238 с. – ISBN 978-966-622-785-3.

4. Волчков Э. П. Пристенные газовые завесы / Э. П. Волчков. – Новосибирск : Наука – Сибирское отделение, 1983. – 240 с.
5. Harrison K. L. Comparison of RANS turbulence models for prediction of film cooling performance / K. L. Harrison, D. G. Bogard // *ASME Conference Publications and Proceedings. Turbo Expo: Power for land, Sea, and Air, June 9–13, 2008, Berlin, Germany*. – 2008. – P. 1187–1196. – DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2008-51423>.

### References (transliterated)

1. Kravchenko I. F., Shkabura V. A., Elanskij A. V. (2013), “Is-sledovanie variantov vozduxo-vozdushnogo teploobmennika dlya oxlazhdeniya turbiny gazoturbinного dvigatelya [The Variants of Air-To-Air Heat Exchanger for Cooling of Gas Turbine Engine Investigation]”, *Aerospace Technic and Technology*, no. 4, pp. 78–82, ISSN 1727-7337.
2. Chen, X. Wang, Y. Long, Y. Weng, S. (2021), “Effect of Partial Blockage on Flow and Heat Transfer of Film Cooling with Cylindrical and Fan-Shaped Holes”, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 164, no. paper 106866, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106866>.
3. Khalatov A. A., Borisov I. I., Dashevsky Yu. Ya., Reznik S. B. (2016), *Teploobmen i gidrodinamika v polyax centrobezhnykh massovykh sil : monogr. : T. 10: Perspektivnye sxemy plenochного oxlazhdeniya* [Heat transfer and hydrodynamics in the fields of centrifugal mass forces : monograph : Vol. 10: Prospective film cooling schemes], NTUU “KPI”, Kiev, Ukraine, 238 p, ISBN 978-966-622-785-3.
4. Volchkov E. P. (1983), *Wall gas curtains*, Science – Siberian Branch, Novosibirsk, 240 p.
5. Harrison K. L., Bogard D. G. (2008), “Comparison of RANS turbulence models for prediction of film cooling performance”, *ASME Conference Publications and Proceedings. Turbo Expo: Power for land, Sea, and Air, June 9–13, 2008, Berlin, Germany*, pp. 1187–1196, <https://doi.org/10.1115/GT2008-51423>.

Надійшла (received) 22.10.2023

### Відомості про авторів / About the Authors

**Данилов Михайло Андрійович (Danylov Mykhailo)** – аспірант, провідний інженер, Інститут технічної теплофізики НАН України, відділ високотемпературної термогазодинаміки (ВТТГД); м. Київ; тел.: (050) 356–82–61; e-mail: [rescruitabx@gmail.com](mailto:rescruitabx@gmail.com).

**Доник Тетяна Василівна (Donyk Tetiana)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший викладач, Інститут технічної теплофізики НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; м. Київ; тел.: (063) 483–18–45; e-mail: [donyktv@gmail.com](mailto:donyktv@gmail.com). <https://orcid.org/0000-0002-1476-5560>.