

ВПЛИВ ФАКТОРУ ІНТЕНСИВНОСТІ ТУРБУЛЕНТНОСТІ ПОТОКУ ТЕПЛОНОСІЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

М. А. Данилов^{1,а}, А. А. Халатов^{1,2}

¹ Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

² Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

Анотація

У роботі досліджено спільний вплив інтенсивності турбулентності основного потоку ($Tu = 1; 5; 10\%$) та часткового блокування отворів видуву охолоджувача ($h/d = 0; 0,5; 1,0$) на ефективність плівкового охолодження плоскої поверхні за температурних умов, наближених до реальних умов експлуатації ГТУ. Чисельне моделювання виконано в ANSYS CFX 2019 R2 із застосуванням SST-моделі турбулентності для значень параметра вдуву $m = 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$.

Встановлено інверсійний характер впливу турбулентності: при $h/d = 0$ та $m = 0,4$ зростання Tu від 1 до 10 % знижує усереднену по ширині ефективність у дальньому полі ($x/d = 15$) на 4 — 13 %, тоді як при $m \geq 0,8$ та частковому блокуванні зростання Tu її підвищує: до +41 % локально та +27 % інтегрально (при $m = 1,0$, $h/d = 1,0$). Ефект пояснюється інтенсифікацією турбулентної дифузії та повторним приєднанням відірваного потоку охолоджувача за умов сильного відриву.

Ключові слова: інтенсивність турбулентності, ефективність плівкового охолодження, блокування отворів, комп'ютерне моделювання.

Вступ

Сучасні ГТУ працюють за температур основного потоку 1700 — 1750 °C [1], що значно перевищує термостійкість жароміцних суперсплавів лопаток. Це створює виклик, що збільшує актуальність використання технологій охолодження, зокрема плівкового охолодження, для забезпечення надійності лопаткового апарату турбіни.

У реальних умовах експлуатації ефективність плівкового охолодження визначається не лише параметрами потоку (m , Tu) та геометрією отворів, а й їхнім частковим блокуванням внаслідок осадження частинок $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ [2, 3]. Водночас рівень турбулентності на виході з камери згоряння може перевищувати $Tu = 20\%$ [4], тоді як класичні валідаційні експерименти виконано при $Tu < 1\%$ [5, 6]. Сучасні CFD-дослідження застосовують $Tu = 2 — 7,5\%$ [7] та $Tu \approx 5\%$ [8].

Дослідження Saumweber і Schulz [7] та Baldauf зі співавторами [9] показали неоднозначний характер впливу Tu : поблизу отворів ефективність зростає за рахунок поперечного розповсюдження плівки, а у дальньому полі — знижується через інтенсифіковане змішування. Деградаційну поведінку $\bar{\eta}$ при частковому блокуванні детально проаналізовано у [2], де виявлено перехід від режиму “приєднаного” струменя до “відірваного-з-повторним-приєднанням” при

зростанні ефективного імпульсного співвідношення. Однак систематичне дослідження спільного впливу Tu та блокування на ефективність відсутнє [8, 10].

Попередня робота авторів [1] встановила зниження ефективності на 13,7 % при $h/d = 0,5$ та 28,6 % при $h/d = 1,0$ за низької $Tu = 1\%$, проте вплив підвищеної турбулентності за умов блокування не розглядався.

Метою даної роботи є чисельне дослідження спільного впливу $Tu = 1; 5; 10\%$ та блокування отворів ($h/d = 0; 0,5; 1,0$) на ефективність плівкового охолодження за температурних умов, наближених до експлуатаційних, для значень $m = 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$. **Наукова новизна** полягає у виявленні інверсійного характеру впливу турбулентності залежно від ступеня блокування.

1. Чисельне моделювання

Геометрична модель та параметри сітки відповідають конфігурації, детально описаній у [1]: плоска поверхня з рядом чотирьох похилих отворів ($d = 0,8$ мм, $\alpha = 30^\circ$, $t/d = 3,0$) при трьох конфігураціях блокування ($h/d = 0; 0,5; 1,0$, що відповідає 0/25/50 % перекриття перерізу). Гібридна неструктурована сітка (~1,1 млн. елементів) складається з тетраедричних елементів в основному потоці та призматичних шарів поблизу поверхні, що забезпечують $y^+ < 1$ на твердій поверхні.

Розрахунки виконано в ANSYS CFX 2019 R2

^аdanylovmykhailo24@gmail.com

(RANS, SST-модель [1, 11]). Швидкість основного потоку — 400 м/с, статична температура — 1100 °С, температура охолоджувача — 500 °С, що відповідає температурним умовам, наближеним до реальних режимів ГТУ [1]. Інтенсивність турбулентності основного потоку варіювалась відповідно до значень $Tu = 1; 5; 10\%$, параметр вдуву — $m = 0, 4; 0, 6; 0, 8; 1, 0$. Тверді границі — адіабатичні, бічні — симетрія. Ефективність плівкового охолодження визначалась за адіабатичною ефективністю [1]:

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

де T_{∞}^* — повна температура основного потоку, T_{aw} — адіабатична температура поверхні, T_2^* — температура охолоджувача на виході.

2. Верифікація

Верифікацію проведено за центральною лінією ($y = 0$) для базової конфігурації ($h/d = 0, m = 1, 0, Tu = 1\%$), що відповідає $I = m^2/DR \approx 0,56$. Порівняння виконано з експериментальними даними Pedersen [5] ($DR = 1,97, I = 0,56, \alpha = 35^\circ, L/d \approx 40, Tu = 0,3 - 0,4\%$) та Sinha [6] ($DR = 2,0, I = 0,5; \alpha = 35^\circ, L/d = 1,75, Tu \approx 0,2\%$) у діапазоні $x/d \geq 4$. Обрані експерименти обмежують розрахунковий випадок ($DR = 1,8$) з обох боків за щільнішим відношенням. Низькі значення Tu у наведених експериментах відповідають вхідній $Tu = 1\%$ поточного розрахунку.

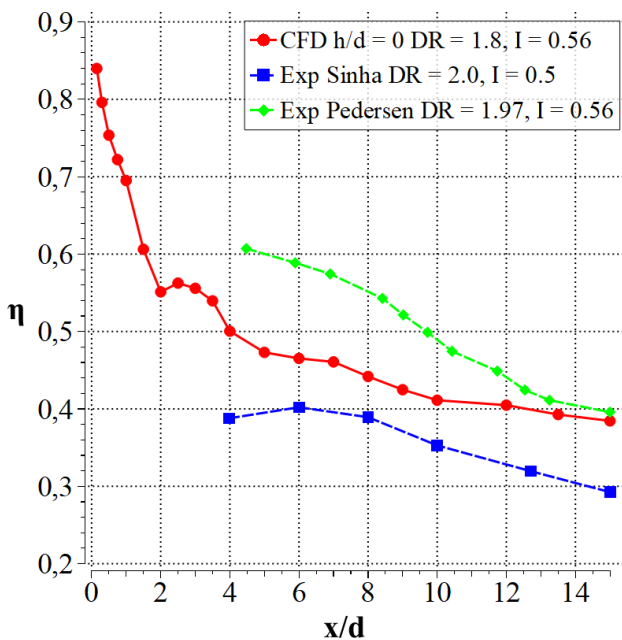


Рис. 1. Розподіл ефективності плівкового охолодження по центральній лінії струменя при $m = 1, 0, h/d = 0, Tu = 1\%$: 1 — CFD, поточний розрахунок; 2 — Sinha, $DR = 2, 0$ [6]; 3 — Pedersen, $DR = 1, 97$ [5].

Як видно з рис. 1, розрахункова крива відтворює характерну поведінку: швидке падіння η при $x/d < 2$, перехідну ділянку у зоні $x/d \approx 2 - 4$ (відрив з

подальшим приєднанням струменя) та плавне зниження у дальньому полі. У діапазоні $4 \leq x/d \leq 15$ абсолютне відхилення розрахункових значень становить $|\Delta\eta| \leq 0,11$ від даних Pedersen та $|\Delta\eta| \leq 0,12$ від даних Sinha. Розташування CFD-кривої між обома експериментальними наборами якісно відповідає проміжному значенню $DR = 1,8$. Отриманий рівень узгодження є типовим для RANS-розрахунків з SST-моделлю турбулентності [10] та достатнім для параметричного аналізу відносних відмінностей між конфігураціями, на яких базуються основні висновки роботи.

3. Поперечна ефективність плівкового охолодження

На рис. 2–5 наведено розподіл усередненої по ширині пластини ефективності $\bar{\eta}(x/d)$ для $m = 0, 4; 0, 6; 0, 8; 1, 0$. Кожен графік містить дев'ять кривих: три ступені блокування ($h/d = 0; 0, 5; 1, 0$) $\times$ три рівні Tu (1; 5; 10 %).

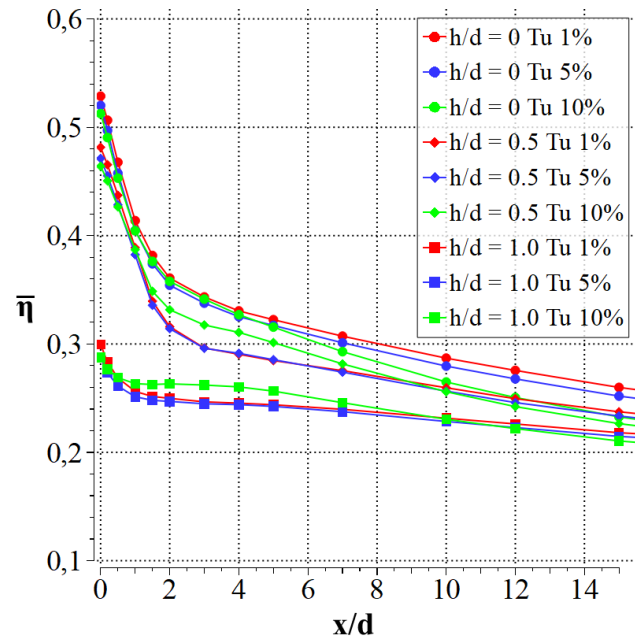


Рис. 2. Усереднена по ширині ефективність $\bar{\eta}(x/d)$ при $m = 0, 4$.

У безпосередньому близькому полі ($x/d \leq 1$) вплив Tu є слабким ($\Delta\bar{\eta} \leq 0,03$), оскільки локальна турбулентність струменя домінує [7, 9]; визначальним параметром тут є ступінь блокування.

Принципова зміна характеру впливу Tu виявляється у дальньому полі ($x/d \geq 5$). При $m = 0, 4$ (рис. 2) зростання Tu знижує $\bar{\eta}$ на $x/d = 15$: для $h/d = 0$ — з 0,260 до 0,225 (–13 %), для $h/d = 1, 0$ — з 0,225 до 0,215 (–4 %), що відповідає класичному сценарію [7, 9]. При $m = 0, 6$ (рис. 3) для $h/d = 0$ тенденція зберігається, однак при $h/d = 0, 5$ та $1, 0$ зростання Tu вже підвищує $\bar{\eta}$ на 0,020 (+8 – 9 %).

При $m = 0, 8$ (рис. 4) ефект інверсії розвивається повною мірою: при $h/d = 0, 5$ зростання Tu підвищує $\bar{\eta}$ з 0,225 до 0,270 (+20 %); при $h/d = 1, 0$ — з 0,180

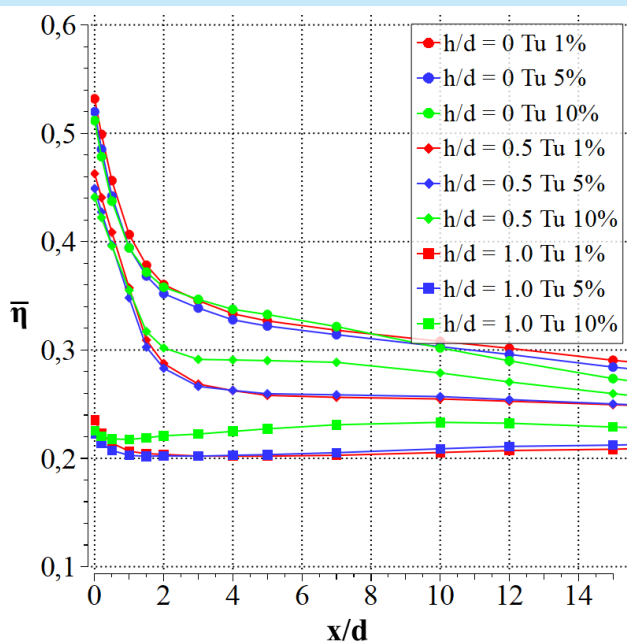


Рис. 3. Усереднена по ширині ефективність $\bar{\eta}(x/d)$ при $m = 0,6$.

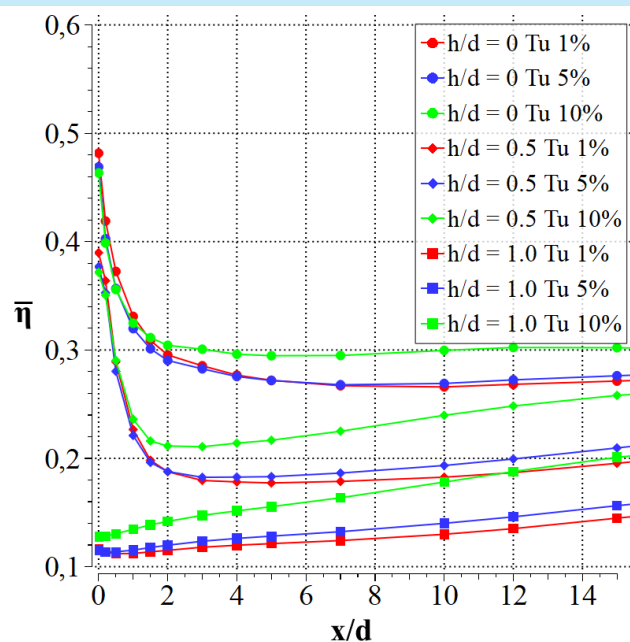


Рис. 5. Усереднена по ширині ефективність $\bar{\eta}(x/d)$ при $m = 1,0$.

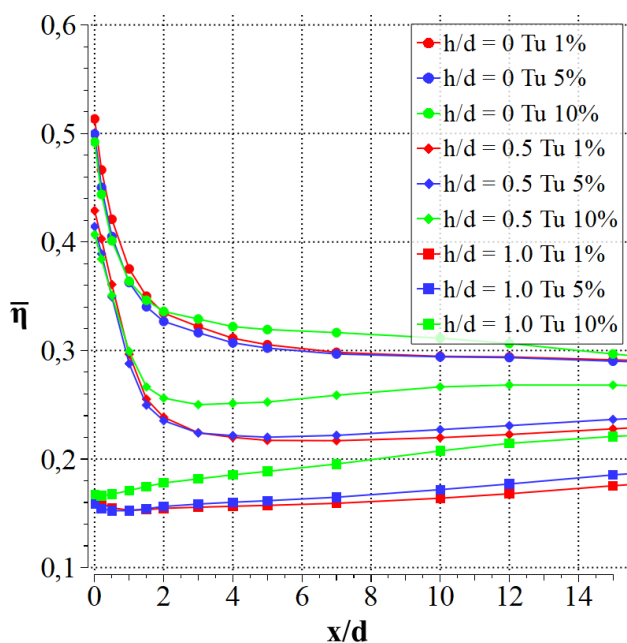


Рис. 4. Усереднена по ширині ефективність $\bar{\eta}(x/d)$ при $m = 0,8$.

до 0,220 (+22 %). При $m = 1,0$ (рис. 5) інверсія спостерігається для всіх конфігурацій. Найсильніший ефект — при $h/d = 1,0$: $\bar{\eta}$ зростає з 0,145 до 0,205 (+41 %); при $h/d = 0,5$ — з 0,200 до 0,260 (+30 %); навіть для $h/d = 0$ — з 0,265 до 0,300 (+13 %).

Виявлений ефект пов'язаний зі зміною режиму взаємодії струменя з поверхнею. При низьких m струмінь утворює стійку плівку, і підвищення Tu прискорює її дисипацію. При сильному відриві ($m \geq 0,8$ або значне блокування) основна частина охолоджувача проходить над поверхнею; підвищена Tu інтенсифікує турбулентну дифузію відірваної струї, сприяючи її повторному приєднанню. Аналогічний

перехід до режиму “detached-then-reattached” з відновленням ефективності при високих ефективних імпульсних співвідношеннях зафіксовано у [2].

4. Площинна ефективність плівкового охолодження

Для оцінки інтегрального теплозахисного ефекту обчислено усереднену по площі ($0 \leq x/d \leq 15$) ефективність плівкового охолодження $\bar{\eta}(m)$ (рис. 6).

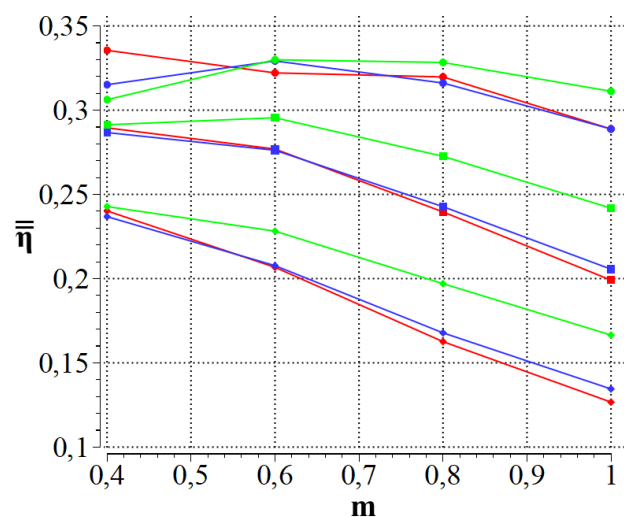


Рис. 6. Усереднена по площі ефективність плівкового охолодження $\bar{\eta}$ за різних m , h/d та Tu .

При $m = 0,4$ і $h/d = 0$ зростання Tu знижує $\bar{\eta}$ з 0,335 до 0,305 (−9 %), тоді як при $h/d = 1,0$ вплив

Tu практично зникає. При $m = 0,8$ та $h/d = 0,5$ зростання Tu підвищує $\bar{\eta}$ з $0,240$ до $0,275$ (+15 %); при $h/d = 1,0$ — з $0,165$ до $0,200$ (+21 %). Найбільший інтегральний приріст — при $m = 1,0$: $h/d = 0,5$ — з $0,200$ до $0,245$ (+23 %); $h/d = 1,0$ — з $0,130$ до $0,165$ (+27 %); навіть $h/d = 0$ — з $0,290$ до $0,310$ (+7 %).

З практичної точки зору необхідно розрізняти два ефекти. Деградація від блокування (база — $h/d = 0$) при $m = 1,0$ становить -55 % при $Tu = 1$ % та -47 % при $Tu = 10$ %. Приріст від зростання Tu (база — $Tu = 1$ %) при $m = 1,0$, $h/d = 1,0$ становить $+27$ %. Отже, оцінка деградації від блокування, виконана за даних низької турбулентності ($Tu \approx 1$ %), систематично завищує реальні втрати теплозахисту в умовах ГТУ, де $Tu \geq 5$ %.

Висновки

Проведено чисельне дослідження спільного впливу $Tu = 1; 5; 10$ % та блокування отворів ($h/d = 0; 0,5; 1,0$) на ефективність плівкового охолодження за температурних умов, наближених до реальних режимів ГТУ, для значень $m = 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$.

Виявлено ефект режимної зміни впливу Tu : при $m = 0,4$ зростання Tu знижує ефективність на $4 - 13$ % (класичний механізм); при $m \geq 0,8$ зростання Tu підвищує ефективність, особливо за умов блокування. Максимальний ефект — при $m = 1,0$, $h/d = 1,0$: $+41$ % локально ($x/d = 15$) та $+27$ % інтегрально (база — $Tu = 1$ %).

Фізичний механізм: сильний відрив струменя ($m \geq 0,8$ або значне блокування) переводить систему в режим, де підвищена Tu інтенсифікує турбулентну дифузію та сприяє повторному приєднанню, частково компенсуючи деградацію теплозахисту.

Деградація ефективності плівкового охолодження від блокування при високій турбулентності зменшується: при $m = 1,0$ перехід $h/d = 0 \rightarrow 1,0$ знижує $\bar{\eta}$ на 55 % при $Tu = 1$ %, але лише на 47 % при $Tu = 10$ %. Отже, оцінка втрат теплозахисту, отримана за лабораторних умов з $Tu \approx 1$ %, систематично завищує реальні втрати в умовах ГТУ.

Перелік використаних джерел

1. Данилов М. А., Халатов А. А. Вплив неізотермічності на ефективність плівкового охолодження при частковому блокуванні отворів видування охолоджувача // Теплофізика та теплоенергетика. — 2026. — Т. 48, № 1. — С. 5—16. — DOI: [10.31472/ttpe.1.2026.1](https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2026.1). — URL: <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2026.1>.
2. 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. — P. 106866. — DOI: [10.1016/j.ijthermalsci.2021.106866](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106866). — URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106866>.
3. Turbine Nozzle Guide Vane Endwall Film Cooling and Vane Phantom Cooling Performances at Various Blocked Film Hole Configurations / B. Bai, X. Chen, H. Zhang, Z. Li, J. Li, S. Mao, W. F. Ng // ASME Journal of Turbomachinery. — 2025. — Vol. 147, no. 10. — P. 101003. — DOI: [10.1115/1.4067932](https://doi.org/10.1115/1.4067932). — URL: <https://doi.org/10.1115/1.4067932>.
4. U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. Gas Turbine Handbook, Section 4.2.2.1: Film Cooling. — URL: <https://netl.doe.gov/sites/default/files/gas-turbine-handbook/4-2-2-1.pdf>; Accessed: 2026-05-02.
5. Pedersen D. R., Eckert E. R. G., Goldstein R. J. Film Cooling With Large Density Differences Between the Mainstream and the Secondary Fluid Measured by the Heat-Mass Transfer Analogy // ASME Journal of Heat Transfer. — 1977. — Vol. 99. — P. 620–627. — DOI: [10.1115/1.3450757](https://doi.org/10.1115/1.3450757). — URL: <https://doi.org/10.1115/1.3450757>.
6. Sinha A. K., Bogard D. G., Crawford M. E. Film-Cooling Effectiveness Downstream of a Single Row of Holes With Variable Density Ratio // ASME Journal of Turbomachinery. — 1991. — Vol. 113, no. 3. — P. 442–449. — DOI: [10.1115/1.2927894](https://doi.org/10.1115/1.2927894). — URL: <https://doi.org/10.1115/1.2927894>.
7. Saumweber C., Schulz A., Wittig S. Free-Stream Turbulence Effects on Film Cooling With Shaped Holes // ASME Journal of Turbomachinery. — 2003. — Vol. 125. — P. 65–73. — DOI: [10.1115/1.1515336](https://doi.org/10.1115/1.1515336). — URL: <https://doi.org/10.1115/1.1515336>.
8. Bunker R. S. Film Cooling Technology for Gas Turbines: A Review // ASME Journal of Turbomachinery. — 2020. — Vol. 142, no. 8. — P. 081004. — DOI: [10.1115/1.4046723](https://doi.org/10.1115/1.4046723). — URL: <https://doi.org/10.1115/1.4046723>.
9. Correlation of Film-Cooling Effectiveness From Thermographic Measurements at Enginelike Conditions / S. Baldauf, M. Scheurlen, A. Schulz, S. Wittig // ASME Journal of Turbomachinery. — 2002. — Vol. 124, no. 4. — P. 686–698. — DOI: [10.1115/1.1504443](https://doi.org/10.1115/1.1504443). — URL: <https://doi.org/10.1115/1.1504443>.
10. Walters D. K., Leylek J. H. A Detailed Analysis of Film Cooling Physics // ASME Journal of Fluids Engineering. — 2021. — Vol. 143, no. 2. — P. 021401. — DOI: [10.1115/1.4048412](https://doi.org/10.1115/1.4048412). — URL: <https://doi.org/10.1115/1.4048412>.
11. Khalatov A. A., Panchenko N. A., Severin S. D. Numerical simulation of a flat plate film cooling with a coolant supply into different shape indentations // Thermophysics and Aeromechanics. — 2017. — Vol. 24, no. 5. — P. 751–757. — DOI: [10.1134/S0869864317050080](https://doi.org/10.1134/S0869864317050080). — URL: <https://doi.org/10.1134/S0869864317050080>.