

УДК 532.525.6

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДА РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СЕРЕДНІХ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ СТРУМИННОМУ ОХОЛОДЖЕННІ ПОВЕРХНІ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

О. В. Шеліманова, кандидат технічних наук, доцент

В. Р Ткаченко, студент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: shelemanova@ukr.net

Анотація. Одним з найефективніших способів інтенсифікації теплообміну при обдуванні поверхонь повітрям є струминний обдув. Висока інтенсивність процесів переносу при струминному обтіканні, відносно невеликі затрати енергії на його здійснення, простота та гнучкість керування цим процесом призвели до широкого застосування його у різних галузях.

Математичне моделювання закономірностей теплообміну в системах імпульсних струмин суттєво ускладнене внаслідок тривимірного характеру струминно-каналного потоку поблизу поверхонь складної форми. Тому доцільним є застосування експериментальних методів дослідження.

Мета дослідження – обґрунтувати застосування метода регулярного теплового режиму для визначення середнього коефіцієнта тепловіддачі при струминному охолодженні поверхні.

Регулярний режим охолодження (нагрівання) тіл характеризується тим, що відносна швидкість зміни надлишкової температури для всіх точок тіла залишається величиною постійною. Оскільки теплова модель була виконана з високо теплопровідного дюралюмінієвого сплаву, виконувалась умова $Bi < 0,1$, коли усереднені по поверхні і об'єму температури будуть однакові. Тому в дослідах фіксувались показання лише однієї терморпарі.

Для співставлення результатів цього експериментального дослідження з результатами інших авторів були обрані випадки обдування гладкої угнутої поверхні одно - та трирядними системами струмин. Перший випадок досліджений у роботах [3,4], другий - у роботі [5].

Результати виконаних тестових експериментів задовільно узгоджуються з даними названих робіт, які були отримані як методом регулярного режиму [5], так і при інших способах реєстрації теплових потоків ([3] - пасивний датчик теплового потоку; [4] - електрокалориметрія). Відмінність середніх коефіцієнтів тепловіддачі від відомих літературних даних не перевищує $\pm 7..12\%$, що свідчить про достатню вірогідність результатів, отриманих у цій роботі, та можливість застосування методу регулярного теплового режиму при дослідженні процесу струминного охолодження тіл складної форми.

Ключові слова: *теплообмін, система струмин, охолодження, угнута поверхня*

Актуальність. Проблеми інтенсифікації теплообміну є дуже актуальними, оскільки доволі часто саме інтенсивність теплообмінних процесів визначає ефективність та експлуатаційну надійність сучасних машин та апаратів, продуктивність багатьох технологічних процесів та якість їх кінцевого продукту. Одним з найефективніших способів інтенсифікації теплообміну при обдуванні поверхонь повітрям є струминний обдув. Висока інтенсивність процесів переносу при струминному обтіканні, відносно невеликі затрати енергії на його здійснення, простота та гнучкість керування цим процесом призвели до широкого застосування його у різних галузях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сільськогосподарському виробництві перфоровані повітропроводи, які утворюють системи круглих або щілинних струмин, використовуються в системах вентиляції тваринницьких приміщень, в системах повітряного опалення споруд захищеного ґрунту[1].

У сушильних установках різного призначення застосовується спосіб струминного підведення сушильного агента. У монографії [2] розглянуті, зокрема, процеси теплообміну і гідравлічного опору при струминному обтіканні рухомої поверхні матеріалу (у вигляді полотна). Проаналізовано вплив конструктивних параметрів струминного модуля і сформульовані умови їх оптимізації.

Математичне моделювання закономірностей теплообміну в системах імпульсних струмин суттєво ускладнене внаслідок тривимірного характеру струминно-каналного потоку поблизу поверхонь складної форми, зокрема, угнутих та ребрих поверхонь. Тому доцільним є застосування експериментальних методів дослідження.

Мета дослідження – обґрунтувати застосування метода регулярного теплового режиму для визначення середнього коефіцієнта тепловіддачі при струминному охолодженні поверхні.

Матеріали та методи дослідження. Середній коефіцієнт тепловіддачі при струминному обдуді ввігнутої ребристої поверхні напівматриці визначався нестационарним методом, що оснований на закономірностях регулярного теплового режиму.

Регулярний режим охолодження (нагрівання) тіл характеризується тим, що зміна температурного поля тіла в часі описується простою експонентою, і відносна швидкість зміна надлишкової температури для всіх точок залишається величиною постійною. Тому кількість теплоти, відведеної від тіла в результаті теплообміну з оточуючим середовищем

$$dQ = \bar{\alpha} \cdot \bar{\vartheta}_F \cdot F \cdot d\tau, \quad (1)$$

дорівнює зміні внутрішньої енергії тіла.

$$Q = -c \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{\partial \bar{\vartheta}_v}{\partial \tau} \cdot d\tau, \quad (2)$$

$$-\frac{\partial \bar{\vartheta}_v}{\partial \tau} = \frac{\bar{\alpha} \cdot F}{c \cdot \rho \cdot V} \cdot \bar{\vartheta}_F, \quad (3)$$

де $\bar{\alpha}$ - середнє значення коефіцієнта тепловіддачі до оточуючого середовища;

F - площа поверхні тіла що охолоджується;

$\bar{\vartheta}_F$ - середня по поверхні тіла надлишкова температура;

$\bar{\vartheta}_v$ - середня по об'єму надлишкова температура.

Розділивши дві частини рівняння (3) на $\bar{\vartheta}_v$ і враховуючи, що $c \cdot \rho \cdot V = C$ - повна теплоємність тіла, отримаємо:

$$-\frac{1}{\bar{\vartheta}_v} \cdot \frac{\partial \bar{\vartheta}_v}{\partial \tau} = \frac{\bar{\vartheta}_F}{\bar{\vartheta}_v} \cdot \frac{\bar{\alpha} \cdot F}{C}. \quad (4)$$

У лівій частині маємо відносну швидкість або темп охолодження m ; позначивши $\varphi = \bar{\vartheta}_F / \bar{\vartheta}_v$ - коефіцієнт нерівномірності розподілу температури тіла, можна записати:

$$m = \varphi \cdot \frac{\bar{\alpha} \cdot F}{C}. \quad (5)$$

Значення коефіцієнту φ можна записати від умов охолодження на поверхні тіла, які, в свою чергу, визначаються значеннями числа Bi . Для умов справжнього експерименту, коли теплообмінна поверхня виготовлена із високо теплопровідного дюралюмінієвого сплаву ($\lambda = 170 \text{ Вт/(м·К)}$), число Bi змінюється в межах $Bi = 0,005 \dots 0,06$ (див. таблицю).

Значення числа Bi для напівматриці з приведеною товщиною $\delta = 12,5 \text{ мм}$ і коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 170 \text{ Вт/(м·К)}$

$\alpha, \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$	50	100	200	300	400
$Bi = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda}$	0,0037	0,0074	0,0147	0,022	0,0294

Таким чином, виконується умова $Bi < 0,1$, що відповідає зовнішній задачі, коли розподіл температури в тілі не залежить від його розмірів і фізичних властивостей і, відповідно, усереднені по поверхні і об'єму температури будуть однакові: $\bar{\vartheta}_F = \bar{\vartheta}_v$. Тоді коефіцієнт нерівномірності розподілу температури в тілі $\varphi = 1$ і залежність (5) буде мати вигляд

$$\bar{\alpha} = \frac{m \cdot C}{F}. \quad (6)$$

При визначенні середніх коефіцієнтів теплопередачі методом регулярного теплового режиму експериментальна напівматриця 1 (рис. 1), розміщена в ізоляційному корпусі 3, нагрівалася до початкової температури порядку 70°C за допомогою знімного електричного нагрівника, температурний напір складав близько 50°C .

Нагрівник являв собою зігнуту пластину, радіус вигинання якого відповідає радіусу ввігнутої поверхні, що нагрівається. На пластину кроком 3 мм навито 22 витка спіралі із ніхромової проволочки діаметром 0,5 мм з питомим опором $1,575 \text{ мОм}\cdot\text{м}$. Живлення на нагрівник подавалося від мережі $\sim 220 \text{ В}$ через регулюючий випрямляч типу ВСА. Потужність нагрівника складала 405 Вт.

У теплообмінну поверхню на різну глибину були запресовані 5 хромель-копельових термопар з діаметром електродів 0,2 мм. Схема розміщення термопар

наведена на рис. 2. Окрема термопара знаходиться в струминному колекторі перед повітророзподільником і слугувала для вимірювання середньої температури повітря на вході в робочу частину.

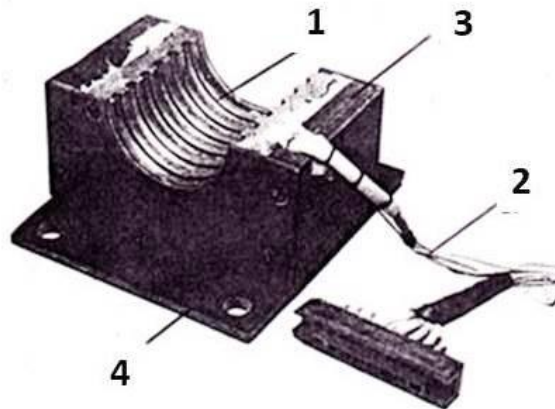


Рис. 1. Експериментальна модель для дослідів з визначення коефіцієнта тепловіддачі:

1 – напівматриця; 2 – термопари; 3 – ізоляційний корпус;
4 – знімна плита

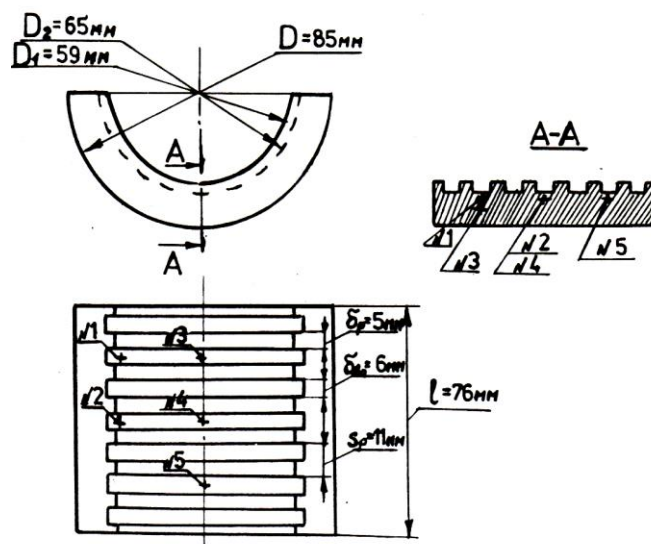


Рис. 2. Схема розміщення термопар у теплообмінній моделі

Експериментально визначалася зміна в часі надлишкової температури $\vartheta(\tau)$ на одній точці поверхні, де $\vartheta = T_W - T_O$, T_W - температура теплообмінної поверхні, а T_O - температура охолоджуючого повітря в струминному колекторі. Побудувавши

залежність $\vartheta = f(\tau)$ в напівлогарифмічній системі координат (рис. 3), темп охолодження поверхні тіла можна визначити на ділянці лінійної зміни функції як:

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1} . \quad (7)$$

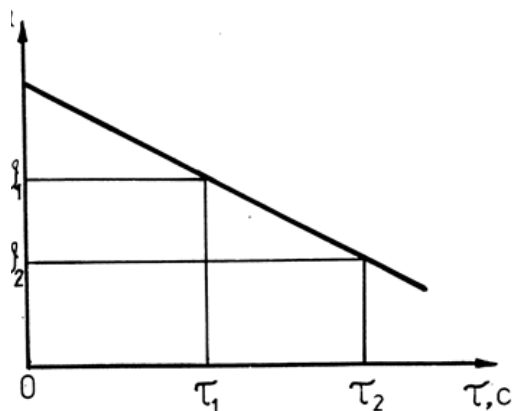


Рис. 3. Графічний спосіб визначення темпу охолодження поверхні

Результати досліджень та їх обговорення. Для співставлення результатів цього експериментального дослідження з результатами інших авторів були обрані випадки обдування гладкої угнутої поверхні одно - та трирядними системами струмин. Перший випадок досліджений у роботах [3,4], другий - у роботі [5].

З наявного набору змінних повітророзподільників вибиралися такі, в яких співвідношення діаметрів отворів перфорації та охолоджуваної поверхні (d/D), відносна відстань до поверхні (h/D) та відносні кроки розташування отворів S_x/d і S_y/d приблизно відповідали цим параметрам у роботах, обраних для порівняння. Досліди виконувалися в діапазоні чисел $Re = (2...40) \cdot 10^3$, у якому справедливі рекомендовані в роботах [3 - 5] емпіричні залежності для чисел $\bar{Nu}$.

На рис. 4 та 5, а наведені дані з тепловіддачі при обдуванні угнутої поверхні з параметром кривизни $d/D = 0,092$ однорядною системою струменів ($n_x=1$)-Повітророзподільник розташовувався так, що відстань до поверхні дорівнює радіусу кривизни останньої (див. рис. 4, а), що відповідає умовам обтікання, дослідженим в роботах [3 - 5], при цьому $h/d = 5,33$.

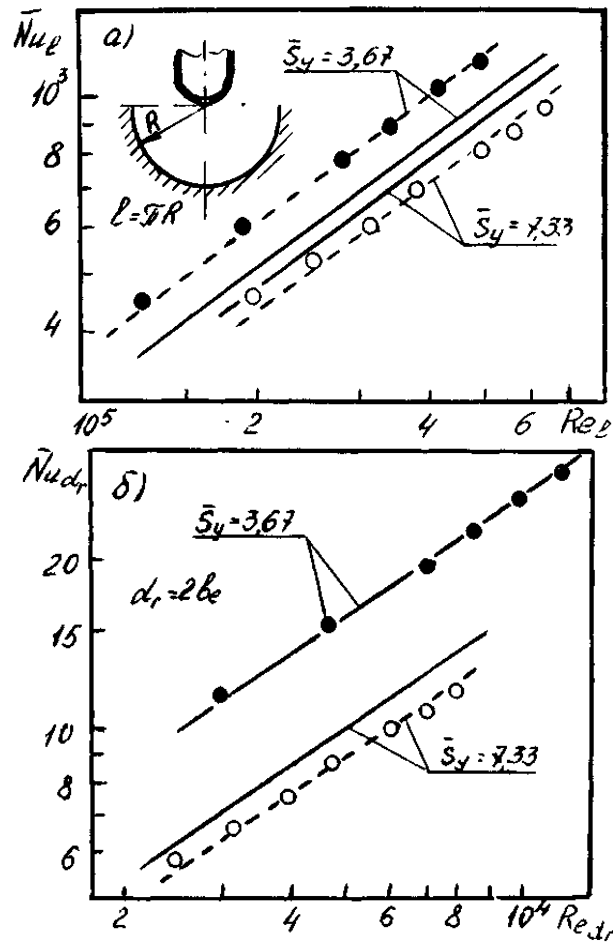


Рис. 4. Результати порівняння експериментів з обдування гладкої угнутої поверхні однорядними системами струмин з даними робіт:
а - [3] ; б - [4]

На рисунку дані експерименту показані точками (світлими - для $\bar{S}_y = 7,33$, темними - для $S_y = 3,67$), а емпіричні залежності, рекомендовані в [3, 4] - суцільними лініями. Видно, що найбільша розбіжність отримана при порівнянні з рекомендаціями роботи [4] (рис.4, а): похибка складає $\approx 12\%$.

Формули, запропоновані в роботах [3] та [5], краще описують одержані експериментальні дані (особливо при малих S_y): середня відхилення не перевищує $\pm 7\%$.

На рис.5, б наведені дані з тепловіддачі при обдування поверхні трирядною струминною системою: точки - результати цієї роботи; суцільні лінії – залежності, запропоновані авторами [5.]. Видно, що відхилення результатів цієї роботи від даних [5] не перевищує 10% .

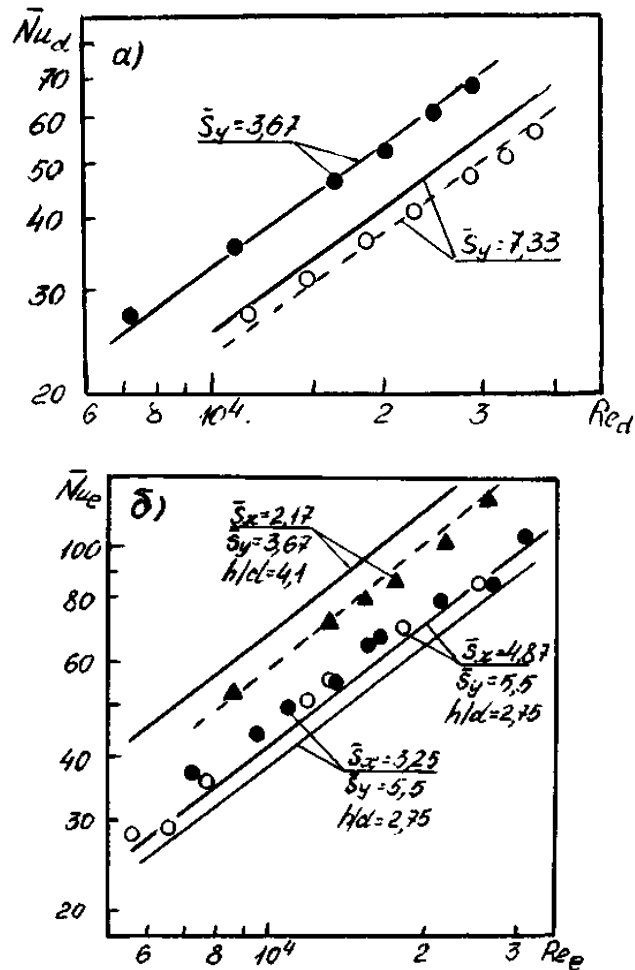


Рис. 5. Результати тестових експериментів з обдування гладкої угнутої поверхні одно- (а) і трирядними (б) системами струмин

Висновки і перспективи. Таким чином, результати тестових експериментів задовільно узгоджуються з даними робіт [3 - 5], отриманими як методом регулярного режиму [5], так і при інших способах реєстрації теплових потоків ([3] - пасивний датчик теплового потоку; [4] - електрокалориметрія). Відмінність середніх коефіцієнтів тепловіддачі від відомих літературних даних не перевищує $\pm 7..12\%$, що свідчить про достатню вірогідність результатів, отриманих у цій роботі, та можливість застосування методу регулярного теплового режиму при дослідженні процесу струминного охолодження тіл складної форми.

Список використаних джерел

1. Теплиці і тепличні господарства: Довідник / Г. Г. Шишко, В. О. Потапов, Л. Т. Сулима, Л. С. Чебанов; За ред. Г. Г. Шишко. К.: Урожай, 1993. 424 с.

2. Шеліманов В. О., Шеліманова О. В. Особливості сушіння матеріалів у продувному шарі. К: ЦП «Компрінт», 2017. 118 с.

3. Hrycak P. Heat transfer from a row of jets impinging of concave semi-cylp/indrical surface. In Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf. Toronto. Hemisphere publ. co. 1978, v.3, pap. EC-II, p.67-72.

4.. Ravuri R., Tabakoff W. Heat transfer characteristics of a row of air jets impinging on the inside of a semi - circular cylinder. NASA Technical Paper. 1984. P. 32- 41.

5. Wang B.- G., Cheng J.- R. Experimental investigation of impingement cooling by round jets of multiple rows. J. Engineering Thermophysics. 1982. V.3, №3. H. 235-241.

References

1. Shyshko, H. H., Potapov, V. O., Sulyma, L. T., Chebanov, L. S. (1993). Teplytsi i teplychni hospodarstva: Dovidnyk [Greenhouses and hothouses: Handbook]. Kyiv: Urozhai, 424.

2. Shelimanov, V. O., Shelimanova, O. V. (2017). Osoblyvosti sushinnia materialiv u produvnomu shari [Features of drying materials in the purge layer]. Kyiv: TsP «Komprint», 118.

3. Hrycak, P. (1978). Heat transfer from a row of jets impinging of concave semi-cylp/indrical surface/ In Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf. Toronto. Hemisphere publ. co., 3, 67-72.

4.. Ravuri, R., Tabakoff, W. (1984). Heat transfer characteristics of a row of air jets impinging on the inside of a semi - circular cylinder. NASA Technical Paper, 32- 41.

5. Wang, B.- G., Cheng, J.- R. (1982). Experimental investigation of impingement cooling by round jets of multiple rows. J. Engineering Thermophysics, 3 (3), 235-241.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНИХ КОЭФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ТОЧНОМ ОХЛАЖДЕНИИ ПОВЕРХНОСТИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Е. В. Шелиманова, В. Р. Ткаченко

Аннотация. Одним из самых эффективных способов интенсификации теплообмена при обдувании поверхностей воздухом является струйное обдувание. Высокая интенсивность процессов переноса при струйном обтекании, относительно небольшие затраты энергии на его осуществление, простота и гибкость управления этим процессом привели к широкому применению его в различных отраслях.

Математическое моделирование закономерностей теплообмена в системах импактных струй существенно усложнено в результате трехмерного характера струйно-канального потока вблизи поверхностей сложной формы. Поэтому целесообразно применение экспериментальных методов исследования.

Цель исследования – обосновать применение метода регулярного теплового режима для определения среднего коэффициента теплоотдачи при струйном охлаждении поверхности.

Регулярный режим охлаждения (нагрева) тел характеризуется тем, что относительная скорость изменения избыточной температуры для всех точек тела

остаётся постоянной. Поскольку тепловая модель была выполнена из высоко теплопроводного дюралюминиевого сплава, выполнялось условие $Bi < 0,1$, когда усредненные по поверхности и объёму температуры будут одинаковы. Поэтому в опытах фиксировались показания только одной термопары.

Для сопоставления результатов данного экспериментального исследования с результатами других авторов были выбраны случаи обдува гладкой вогнутой поверхности одно- и трехрядными системами струй. Первый случай исследован в работах [3,4], второй – в работе [5].

Результаты выполненных тестовых экспериментов удовлетворительно согласуются с данными названных работ, которые были получены как методом регулярного режима [5], так и при других способах регистрации тепловых потоков ([3] – пассивный датчик теплового потока; [4] – электрокалориметрия). Отличие средних коэффициентов теплоотдачи от известных литературных данных не превышает $\pm 7..12\%$, что свидетельствует о достаточной вероятности результатов, полученных в данной работе, и возможности применения метода регулярного теплового режима при исследовании процесса струйного охлаждения тел сложной формы.

Ключевые слова: теплообмен, система струй, охлаждение, вогнутая поверхность

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL LINE FOR OBTAINING FLAX TRUST

O. Shelimanova, V. Tkachenko

Abstract. One of the most effective ways to intensify heat transfer when blowing surfaces with air is jet blowing. High intensity of transfer processes during jetting, relatively low energy costs for its implementation, simplicity and flexibility of control of this process have led to its widespread use in various fields.

Mathematical modeling of heat transfer regularities in systems of impact jets is significantly complicated due to the three-dimensional nature of the flue-channel flow near the surfaces of complex shape. Therefore, it is advisable to use experimental research methods.

The purpose of this study is to justify the use of the method of regular thermal regime to determine the average heat transfer coefficient during jet cooling of the surface.

Regular mode of cooling (heating) of bodies is characterized by the fact that the relative rate of change of excess temperature for all points of the body remains constant. Since the thermal model was made of a highly thermally conductive duralumin alloy, the condition $Bi < 0.1$ was met, when the average temperatures on the surface and volume will be the same. Therefore, the experiments recorded the readings of only one thermocouple.

To compare the results of this experimental study with the results of other authors, cases of blowing a smooth concave surface with single - and three - row jet systems were chosen. The first case was studied in [3,4], the second - in [5].

The results of the performed test experiments agree satisfactorily with the data of these works, which were obtained both by the method of regular mode [5] and other methods of recording heat fluxes ([3] - passive heat flux sensor; [4] - electrocalorimetry). The difference between the average heat transfer coefficients and the known literature

data does not exceed $\pm 7..12\%$, which indicates a sufficient probability of the results obtained in this work, and the possibility of using the method of regular thermal regime in the study of jet cooling of complex bodies.

Key words: *heat exchange, jet system, cooling, concave surface*