

УДК 504.06:552.11:697.7

професор **Вадим Корбут**,
predsedatel@emw.kiev.ua ORCID: 0000-0002-0831-2477

доцент **Сергій Рибачов**,
9599770@i.ua ORCID: 0000-0002-0093-9750

Київський національний університет
будівництва і архітектури

ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ ПРИПЛИВНИХ СТРУМИН З КОНВЕКТИВНИМ ПОТОКОМ У НАГРІТИХ ВЕРТИКАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

У статті представлено результати комплексного дослідження взаємодії компактної турбулентної струмини з конвективним потоком, що утворюється біля нагрітої вертикальної поверхні. Особливу увагу приділено виявленню ключових факторів, що визначають інтенсивність цієї взаємодії, зокрема: геометричним параметрам струмини, температурним умовам, а також властивостям робочого середовища. Експериментальні дослідження, проведені з використанням сучасних методів візуалізації потоків та термоанемометрії, дозволили встановити критеріальну залежність відносного рівня взаємодії від числа Архімеда (Ar). Ця залежність кількісно характеризує вплив умов натікання струмини на пластину на процеси тепло- та масообміну в системі. Отримані результати мають важливе теоретичне та прикладне значення. На їх основі розроблено удосконалену модель взаємодії потоків та встановлено граничні режими взаємодії при різних значеннях критерію Ar . Результати дослідження можуть бути корисними для інженерів-теплотехніків, проектувальників вентиляційних систем та розробників технологічного обладнання, де виникають подібні комбіновані течії.

Ключові слова: конвективні потоки, нагріта вертикальна поверхня, взаємодія струмин.

Постановка проблеми. Взаємодія турбулентної повітряної затопленої струмини з конвективним потоком виникає у випадках вентилявання виробничих приміщень з тепловидільним обладнанням у стиснутих умовах. Також подібні взаємодії спостерігаються в технологічних апаратах. Вже понад століття тривають систематичні теоретичні та експериментальні дослідження струминних течій та їхньої взаємодії. Проте на сьогодні недостатньо вивченим залишається навіть найпростіший випадок взаємодії вісесиметричної струмини, випущеної перпендикулярно до плоскої нагрітої або охолодженої поверхні.

Актуальність дослідження. Обдування вентиляційними струминами тепловидільного обладнання створює проблеми завищених тепловтрат від нього, що одночасно знижує ефективність самого обладнання та підвищує навантаження на вентиляцію (кондиціювання повітря). Особливо ця проблема загострюється в стиснутих умовах головних корпусів електростанцій, хімічних виробництв тощо. Тому для забезпечення енергоефективності подібних виробництв необхідно знати закони безпосередньої взаємодії струмин і конвективних потоків.

Аналіз досліджень та публікацій. Розвиток припливних струмин різних типів, вільних та таких, що настилаються на плоску поверхню, достатньо вивчено як теоретично так експериментально, починаючи з початку XX століття (наприклад [1, 2]). Крім того в роботі [3] експериментально досліджено взаємодію конвективних потоків у вертикальних тепловіддавальних поверхнях обладнання з поперечним повітряно-струминним перекриттям для мінімізації температурного розшарування по висоті приміщень. Взаємодію вісесиметричної струмини з пластиною було детально досліджено ще в 70-х роках XX століття завдяки NASA [4]. Серед останніх досліджень відзначимо взаємодію плоских струмин зі всмоктувальним факелом в обмежених умовах [5]. Взаємодії струмин з супутнім і зустрічним потоком присвячено низку робіт XX-XXI століття, причому в роботі [6] теоретично обґрунтовано не лише темп згущання швидкості, але й межу відношення осьової швидкості струмини до швидкості зустрічного потоку з дослідним підтвердженням у роботі [7]. Взаємодію струмини з нагрітою поверхнею досліджували автори робіт [8-9] на підставі CFD-моделювання та експериментальних досліджень. Проте теоретичного опису подібних течій у роботах немає, зокрема, немає опису положення відриву потоків.

Формулювання цілей статті. Отримання закономірностей взаємодії компактних турбулентних струмин з нагрітими вертикальними поверхнями.

Основна частина.

Розглянемо фізичну схему течії. У загальному випадку, компактна струмина розтікаючись по площині розділиться на два основні потоки. Частина струмини, нагріваючись, підніматиметься вгору, інша частина поширюватиметься вниз. На деякому рівні, частина струмини, що розповсюджується вниз (рис. 1) взаємодіючи з конвективним потоком відхиляється від поверхні по нормалі до неї.

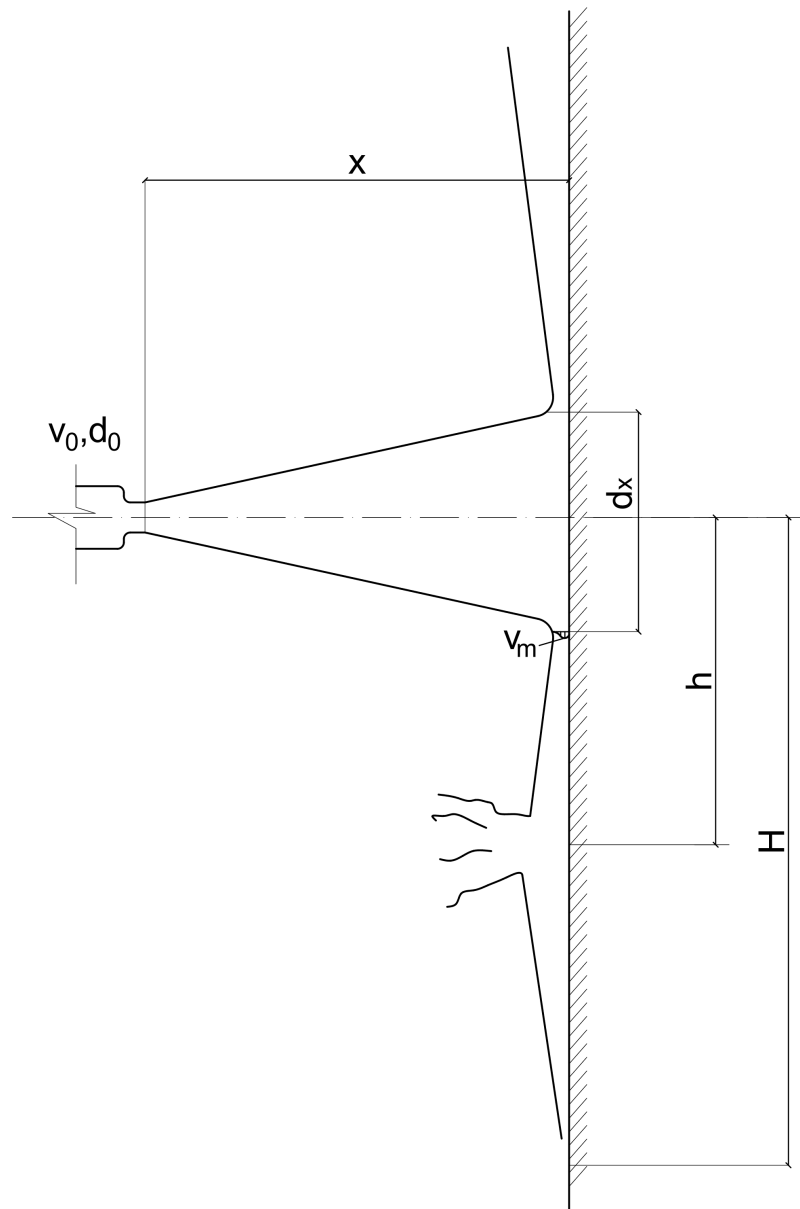


Рис 1. Фізична схема натікання припливної струмини на нагріту поверхню.

На цьому рівні гравітаційні сили, що впливають на струмину (внаслідок її нагрівання), врівноважують інерційні з урахуванням впливу конвективного потоку, що виникає у пластини. На відстані h від осі струмини кількість руху струмини, що настається, стає рівною кількості руху конвективного потоку.

Кількість руху конвективного потоку на рівні взаємодії визначається за залежністю

$$K_k = (0,26 U_1)^2 \rho_k F_k, \quad (1)$$

а кількість руху частки струмини, що направлена донизу, має вигляд

$$K_k = \rho_c (0,546 v_m)^2 F_c \beta, \quad (2)$$

де U_1 - характерна швидкість конвективного потоку [3], м/с; ρ_k, ρ_c - густина повітря відповідно конвективного потоку і струмینی, кг/м³; F_k, F_c - площа поперечного перерізу, відповідно, конвективного потоку і струмینی, м²; v_m - максимальна швидкість струмینی, що настилається на пластину, м/с, і відповідає; β – коефіцієнт Бусінеска для струмینی.

На деякій відстані від низу нагрітої поверхні утворюється зона взаємодії струмینی і конвективного потоку де виконуються умова:

$$K_k = K_c, \quad (3)$$

У зв'язку зі складністю теоретичного визначення було проведене експериментальне дослідження рівня взаємодії залежно від умов витоку струмینی. При аналізі процесів було прийнято такі припущення:

- припливна струмнина є ізотермічною;
- на пластині підтримується постійна температура;
- поздовжня вісь струмینی перпендикулярна нагрітої поверхні пластини.

Для виявлення чинників, що впливають на рівень взаємодії скористаємося можливостями теорії розмірностей.

Напишемо величини, що впливають на рівень взаємодії у функціональній залежності:

$$h = f(a, \nu, d_x, H, \Delta t, g \beta, v_m), \text{ м}, \quad (4)$$

де h – вертикальна відстань від осі до відриву потоків, м; a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с; d_x – діаметр вільної струмینی на відстані x , м, від повітророзподільника (сопла) до пластини, м; z – вертикальна координата напрямку вниз по пластині від осі компактної струмینی, м; H – відстань від нижнього краю пластини до осі струмینی, що набігає на пластину, м; $\Delta t = t_n - t_c$ – різниця температур на поверхні пластини і повітря в струміні, °С; $g \beta = g/T_c$ - величина, що характеризує підйомну силу, м/(с²·°С); v_m – максимальна швидкість струмینی, що настилається на поверхню пластини, в місці розгортання на відстані $d_x/2$ від осі струмینی; ℓ – відстань від сопла до пластини, для основної ділянки струмینی, м; $T_c = 273,15 + t_c$ – температура середовища в струміні, К.

У розмірностях величин беруть участь метр, секунда, градус. Введемо нові змінні:

$$m/L, c/T, ^\circ/\theta$$

Тоді у нових змінних рівняння (4) має вигляд:

$$h/H = f(aL^2/T; \nu L^2/T; d_x L; HL; \Delta t \theta; g \beta L / (T^2 \theta); \nu_m L / T) \quad (5)$$

при $L = 1/H$, $\theta = 1/\Delta t$, $T = \nu/H^2$.

Перетворимо рівняння (5):

$$\frac{h}{H} = f \left(a \frac{\frac{1}{H^2}}{\frac{\nu}{H^2}}, \nu \frac{\frac{1}{H^2}}{\frac{\nu}{H^2}}; \frac{d_x}{H}; 1; 1; g \beta \frac{H^4 \Delta t}{H \nu^2}, \nu_m \frac{H^2}{H \nu} \right)$$

$$h/H = f(a/\nu; d_x/H; g \beta H^3 \Delta t / \nu^2; \nu_m H / \nu) \quad (6)$$

Отримані комплекси відомі як критерії Прандтля, Грасгофа та Рейнольдса, відповідно,

$$\nu/a = Pr; g \beta H^3 \Delta t / \nu^2 = Gr; \nu_m H / \nu = Re$$

Критерій Прандтля Pr практично не залежить від температури повітря. Його можна приймати $Pr = 0,72$.

Для скорочення числа змінних перемножимо:

$$\frac{dx}{H} \cdot \frac{\nu_m H}{\nu} = \frac{\vartheta_c d_x}{\nu} = Re_d \quad (7)$$

Як відомо на розвиток струмин суттєво впливає критерій Архімеда Ar , що визначається як

$$Ar = Gr / Re_d^2. \quad (8)$$

У даному випадку, модифікований критерій Архімеда дорівнює:

$$Ar^* = \frac{g \cdot \beta H^3 \Delta t}{T_c v_c^2 d_x^2}. \quad (9)$$

Таким чином, вдалося виявити, що відносний рівень взаємодії залежить від критерію Архімеда Ar^* та Прандтля Pr . Оскільки в даній роботі розглядається лише повітря, то критерій Прандтля з розгляду можна вилучити.

Величина d_x визначається як:

$$d_x = d_0 + 0,22 x, \text{ м}. \quad (10)$$

Відомі залежності для максимальної швидкості на пластині

$$v_m = \frac{1,22 v_0 d_0}{Z}, \text{ м/с}, \quad (11)$$

$$v_m = \frac{2,44 \vartheta_0 d_0}{d_x}, \text{ м/с}. \quad (12)$$

Метою експериментальних досліджень було визначення рівня взаємодії припливної струмини залежно від умов натікання струмини на пластину і різниці температур пластини та струмини.

Для проведення досліджень було виготовлено експериментальну установку. Вона складалася з вентилятора, повітропроводу, повітророзподільника у вигляді сопла та нагрітої вертикальної пластини зі склотекстоліту. Швидкість обертання вентилятора, а відповідно і витрата повітря регулювалась за допомогою частотного перетворювача. Початкова швидкість, швидкість натікання та температура повітря струмини вимірювалися датчиком швидкості, температури та відносної вологості з радіоінтерфейсом Testo 0635 1571. Температура поверхні пластини визначалася за допомогою термошупа типу Testo 0613 1912 з реєстратором даних Testo 175 T2. Температура повітря в приміщенні вимірювалася термометром рідинним скляним лабораторним з ціною поділки $0,1^\circ\text{C}$.

Під час експерименту на нагріту до заданої температури пластину направляли перпендикулярно припливну струмину зі сопла. Експеримент

починався після того, як процес набував стаціонарного характеру. Вимірювалися температура на поверхні пластини, температура повітря в струмині, швидкість повітря на витікання із сопла. Швидкість повітря в струмині на виході із сопла вимірювалася термоелектроанемометром як середньозважена величина за площею припливного насадка. Рівень взаємодії визначався візуально за допомогою задимлення. Зміни від осі струмини до рівня взаємодії проводилися по координатній сітці на поверхні пластини.

Повторні вимірювання всіх величин виконувалися доти, доки випадкова похибка не ставала несуттєвою порівняно з систематичною. Серії дослідів повторювалися три рази, у підсумкову таблицю заносилися середні значення експериментів. У процесі проведення досліджень варіювалися – відстані від низу пластини до осі струмини, діаметр припливного насадка, діаметр струмини, що розтікається по пластині, відстань від насадки до пластини, швидкість витікання з насадки.

За результатами дослідів побудовано графік залежності відносного рівня взаємодії від умов натікання струмини на пластину. Графік представлений на рис. 2.

Відносно невеликий розкид точок дозволяє зробити висновок про правильний підбір критеріальної залежності для опису процесу взаємодії компактної струмини з конвективним потоком від вертикальної поверхні.

Було отримано апроксимаційне рівняння кривої, що має вигляд:

$$h/H = 1,103 \cdot Ar^{*-0,214} - 0,526. \quad (13)$$

Аналіз характеру кривої показує, що зона взаємодії струмини з конвективним потоком зменшується у разі зростання критерію Архімеда. Можна умовно виділити дві характерні зони взаємодії: $Ar^* < 6$ та $Ar^* > 6$. У зоні $Ar^* < 6$ рівень взаємодії знаходиться нижче місця розвороту струмини на пластині, тобто $h/H > d_x/(2H)$. Зі збільшенням значення $Ar^* > 6$ рівень взаємодії зростає і $h/H < d_x/(2H)$ і схема течії змінюється.

Струмина не встигає повністю розвернутися на пластині, змінюється її профіль швидкості. Оскільки розрахувати це аналітично досить складно, критеріальну залежність варто залишили без змін. У зоні значень $Ar^* > 6$ частина сумарного потоку, що відходить від пластини в результаті взаємодії, підмішується до струмини зі збільшенням її температури, що у свою чергу зменшує поточний імпульс струмини.

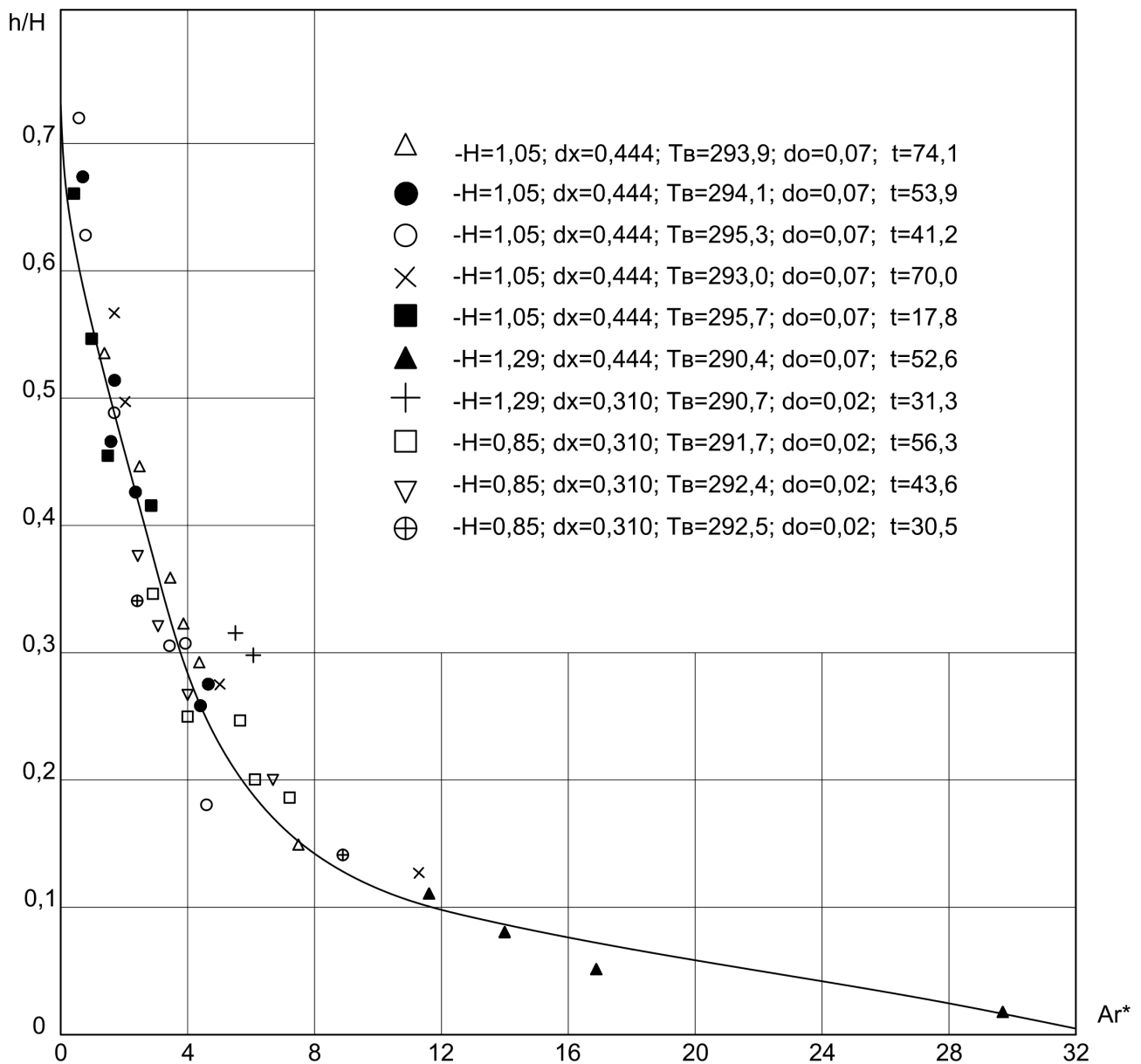


Рис 2. Залежність відносного рівня взаємодії від умов натікання струми на нагріту пластину

Висновки.

Проведені аналітичні дослідження взаємодії струминної течії, що набігає на нагріту поверхню, з конвективним потоком від неї, показав, що відносна висота відриву потоків від поверхні залежить від критеріїв Рейнольдса та Прандтля. Виконані експериментальні дослідження дозволили отримати критеріальну залежність відносного рівня взаємодії від числа Архімеда, що характеризує умови натікання струмини на пластину. Виявлено критичне значення критерію Архімеда 6, при якому змінюється характер взаємодії потоків.

References

1. Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, De Witt D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Seventh Edition. John Wiley & Sons, Inc, 2011.
2. Bradshaw P., Ferriss D.H., Atwell N.P. Calculation of boundary layer development using the turbulent energy equation. Journal of Fluid Mechanics. vol. 28, no. 3, 1967. P. 593–616.
3. Korbut V. P. Pryrodna turbulentna konvektsiia mizh vertykalnymy teploviddavalnymy poverkhniamy. Naukova Dumka, 1996.
4. Gumen O., Dovhaliuk V., Mileikovskiy V. Geometrical and Kinematic Analysis of Turbulence in Jets for Energy Efficient Ventilation. Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym. 2016. № 1(17). P. 15-20.
5. Korbut V., Rybachov S. Improvement of air-jet device enclosures exposed surface of large baths. Ventyliatsiia, osvittlennia ta teplohaзopostachannia. Iss. 17, 2014, pp. 26-31.
6. Gumen O., Dovhaliuk V., Mileikovskiy V. Geometric Modelling of Turbulent Flat Jets in Accompanying and Contrary Flows. Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym. № 1(15), 2015, pp. 70-77.
7. Gumen O., Dovhaliuk V., Mileikovskiy V. Simplified Simulation of Flows with Turbulent Macrostructure. The 4th International Technical Conference on Hydraulic Engineering (CHE 2016): 16-17 July 2016, Hong Kong: Proceedings. CRC Press/Balkema, Leiden, The Netherlands, 2016. P. 251-260.
8. J. M. Buchlin Convective Heat Transfer in Impinging- Gas- Jet Arrangements. Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 4, No. 2, Iss. 1, 2011. pp. 137-149.
9. Bentarzi F., Mataoui A., Mataoui A., Rebay M. Effect of Inclination of Twin Jets Impinging a Heated Wall. Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 12, No. 2, 2019, pp. 403-411.

UDC 504.06:552.11:697.7

Professor **Vadym Korbut**

predsedatel@emw.kiev.ua ORCID: 0000-0002-0831-2477

Associate Professor **Serhii Rybachov**

9599770@i.ua ORCID: 0000-0002-0093-9750

Kyiv National University of Civil
Engineering and Architecture

FEATURES OF INTERACTION BETWEEN SUPPLY JETS AND CONVECTIVE FLOW IN HEATED VERTICAL SURFACES OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

The peculiarities of air distribution in a limited free space under compressed conditions of thermally stressed technological premises require consideration of the interaction of supply jets and convective flows in the heated surfaces of technological equipment. Similar problems of interaction of compact turbulent jets with vertical surfaces also occur in technological equipment. The development of supply jets of various types, which are laid on a flat surface, has been sufficiently studied both theoretically and experimentally since XX century. In addition, there is also a body of experimental research on the interaction of convective flows in vertical heat-dissipating surfaces of equipment with transverse air-jet overlap to minimize temperature stratification along the height of the premises. Analysis of modern developments on this problem showed that there is no data on the thermal and aerodynamic characteristics of the conditions of interaction of compact turbulent jets with vertical heated surfaces of equipment, although as noted above, these issues are relevant for applied problems of aerodynamics and hydraulics. The article presents the results of a comprehensive study of the interaction of a compact turbulent jet with a convective flow formed near a heated vertical surface. Special attention is paid to identifying key factors that determine the intensity of this interaction, in particular: the geometric parameters of the jet, temperature conditions, and properties of the working environment. Experimental studies conducted using modern methods of flow visualization and thermal anemometry allowed us to establish a criterion dependence of the relative level of interaction on the Archimedes number (Ar). This dependence quantitatively characterizes the influence of the conditions of jet flow onto the plate on the processes of heat and mass transfer in the system. The obtained results have important theoretical and applied significance. Based on them, an improved model of flow interaction was developed and the boundary conditions of interaction were established for different values of the Ar criterion. The results of the study may be useful for heat engineers, designers of ventilation systems and developers of technological equipment where similar combined flows occur.

Keywords: convective flows, heated vertical surface, jet interaction.