

УДК 697.922.565; 697.921.47

Математичне моделювання закрученої припливної струмини в змінному режимі із застосуванням різних моделей турбулентності

О. Т. Возняк¹, В. Б. Довгалюк², І. Є. Сухолова³, О. М. Довбуш⁴

¹Доктор технічних наук, доцент. Кафедра теплогазопостачання і вентиляції. Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна, orest.voznyak@i.ua, ORCID: 0000-0002-6431-088X

²Кандидат технічних наук, професор. Кафедра теплогазопостачання і вентиляції. Київський Національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, 2280170@ukr.net ORCID: 0000-0002-4836-5354

³Кандидат технічних наук, асистент. Кафедра теплогазопостачання і вентиляції. Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна, isukholova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3319-2278

⁴Старший викладач. Кафедра теплогазопостачання і вентиляції. Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна, dovbus.ol@gmail.com ORCID: 0000-0003-0272-6764

Анотація. Робота присвячена вирішенню актуальної задачі підвищення ефективності розподілу повітря закрученими та настильними струминами повітря для забезпечення нормативних параметрів повітря в приміщеннях. Розроблено математичну модель подачі повітря закрученими та настильними повітряними струминами в приміщенні. Показано, що для досягнення максимальної ефективності розподілу повітря необхідно забезпечити подачу повітря струминами, які інтенсивно затухають перед входом до робочої зони. Моделювання потоку повітря здійснювалося за допомогою програми CFD Ansys FLUENT. Подано розв'язки за допомогою однопараметричної моделі турбулентності Спаларта–Аллараса та $k-\epsilon$ моделі. Представлено графічні та аналітичні залежності на основі проведених експериментальних досліджень, які можуть бути використані в інженерних розрахунках. Визначено динамічні параметри повітряного потоку, що створюється завдяки закрученим та настильним повітряним струминам під час їхнього витікання у змінному режимі та формування динамічного мікроклімату в приміщенні. Наведено результати експериментальних досліджень подачі повітря в приміщення двострумним повіторозподільним пристроєм, що утворює закручену та настильну повітряні струмини для створення інтенсивнішої турбулізації припливного повітряного потоку. Отримані результати цих досліджень дають можливість здійснити інженерні розрахунки розподілу повітря закрученими та настильними струминами повітря.

Ключові слова: розподіл повітря, закручена струмина, настильна струмина, змінний режим, динамічний мікроклімат, швидкість повітря, швидкість потоку

Вступ. Ефективність роботи людини значною мірою залежить від того, як санітарно-гігієнічні параметри мікроклімату відповідають фізіологічним потребам [1]. Стан повітряного середовища приміщення визначається температурою, відносною вологістю, швидкістю повітря, шумом, концентрацією пилу, наявністю запахів тощо. Для забезпечення нормованих параметрів повітряного середовища в робочій зоні приміщень необхідно, щоб розподіл припливного повітря був ефективним. Унаслідок цього способи та пристрої розподілу повітря суттєво впливають на техніко-економічні параметри системи забезпечення мікроклімату в цілому. Щоб вибрати спосіб розподілу повітря необхідно враховувати будівельні особливості приміщення, розташування та розмір джерел теплоти, вологи й шкідливих газів.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Аналіз літературних даних засвідчив, що вплив швидкості руху повітря на комфортний стан людини необхідно розглядати сукупно з температурою, відносною вологістю повітря, інтенсивністю турбулентності повітряних потоків, температурою поверхонь та термічним опором одягу [2, 3]. Проаналізовано

вплив змінного режиму подачі повітря на самопочуття людини та ефективність її праці [4, 5]. У виробничих приміщеннях для адаптації апарату терморегуляції, покращення самопочуття і зниження втомлюваності працівників, особливо за монотонного характеру роботи, гігієнічно обґрунтовано змінювати за періодичним законом один з параметрів, наприклад температуру чи швидкість руху повітря, тобто створювати динамічний мікроклімат [6]. Поряд із періодичною зміною продуктивності вентиляції змінюється за періодичним законом концентрація CO_2 у приміщенні [7, 8].

Розглянуто та проаналізовано схеми розподілу повітря, які найбільш доцільно застосовувати у приміщенні з урахуванням затухання припливних неізотермічних струмин. Обґрунтовано, що максимальної ефективності можна досягнути при використанні горизонтальних плоских струмин з ефектом їхнього настилення, а також вертикальні закручені потоки [9, 10]. Розроблено (рис. 1) двострумний пристрій розподілу повітря (ДСПР). Він створює закручений та настильний на плоску поверхню струмини повітря, що витікають у змінному режимі [9, 10] (рис. 1).

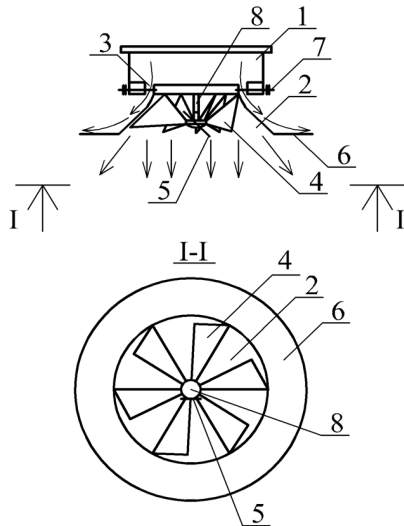


Рис. 1. Двострумний повітророзподільник із утворенням закрученої та плоскої настільної струмини: 1 – патрубок; 2 – дифузор; 3 – кільцева регульована щілина; 4 – пластини; 5 – ручка керування; 6 – відбійний козирок; 7 – гвинт регулювання щілини; 8 – стержень

Виконано чисельне моделювання струмини за моделями турбулентності $k-\epsilon$ і Спаларта-Аллмараса в нестационарному режимі [13-15].

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є удосконалити математичну модель припливної закрученої повітряної струмини з використанням моделі турбулентності Спаларта-Аллмараса та $k-\epsilon$ моделі у нестационарному режимі.

Основна частина. Розглянемо витікання потоку повітря в нестационарному режимі із ДСПР у вільний простір (рис. 1) [9, 10]. Осьова швидкість v_x у визначеній точці A з координатою x_A у випадку стаціонарного режиму визначається за відомою формулою розрахунку осьової швидкості v_0 , м/с [16].

$$v_x = v_0 m \frac{\sqrt{F_0}}{x}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

де m – коефіцієнт затухання швидкості струмини; F_0 – площа живого перерізу повітророзподільника, м^2 .

Приймається синусоїдальний закон зміни початкової швидкості

$$v_0 = v_{cep} + A \sin \omega \tau, \text{ м/с}, \quad (2)$$

де v_{cep} – середнє значення швидкості v_0 , м/с, за період коливань від мінімального v_{0min} , м/с, до мінімального v_{0max} , м/с, значення

$$v_{cep} = \frac{v_{0,max} + v_{0,min}}{2}, \text{ м/с}; \quad (3)$$

A – амплітуда коливань швидкості v_0 :

$$A = \frac{v_{0,max} - v_{0,min}}{2}, \text{ м/с}; \quad (4)$$

ω – циклічна (колова) частота коливань:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \text{ с}^{-1}; \quad (5)$$

τ – проміжок часу, с; T – період коливань, с.

У початковий момент часу прийнято нейтральне положення пластин на рис. 1.

Аналогічно, можна записати вираз для коливання осьової швидкості з урахуванням залежності (5):

$$v_x = v_{x,cep} + B \sin \left(\frac{2\pi}{T} \tau - \phi \right), \text{ м/с}, \quad (6)$$

де B – амплітуда коливання осьової швидкості, м/с; ϕ – початкова фаза.

Оскільки осьова швидкість v_x запізнюється за фазою порівняно з v_0 , то початкова фаза надходить у вираз (6) з негативним знаком. Середні значення v_x , м/с, та амплітуда їхніх відхилень B , м/с, визначаються аналогічно формулам (3) та (4):

$$v_{x,cep} = \frac{v_{x,max} + v_{x,min}}{2}, \text{ м/с}; \quad (7)$$

$$B = \frac{v_{x,max} - v_{x,min}}{2}, \text{ м/с}. \quad (8)$$

З рівнянь (1-8) отримуємо:

$$\begin{aligned} & v_{x,cep} + B \sin(\omega \tau - \phi) = \\ & = v_{0,cep} \frac{m \sqrt{F_0}}{x} + A \frac{m \sqrt{F_0}}{x} \sin \omega \tau, \text{ м/с}. \end{aligned} \quad (9)$$

Оскільки постійний режим є частковим випадком нестационарного режиму з амплітудою коливань $A = 0$ і $B = 0$, то рівняння (9) набуває вигляду аналогічно формулі (1)

$$v_{x,cep} = v_{0,cep} m \frac{\sqrt{F_0}}{x}, \text{ м/с}. \quad (10)$$

За рівняннями (9) і (10), маємо:

$$B \sin\left(2\pi \frac{\tau}{T} - \phi\right) = A \frac{m\sqrt{F_0}}{x} \sin\left(2\pi \frac{\tau}{T}\right), \text{ м/с.} \quad (11)$$

З рівняння (11)

$$B = A \frac{m\sqrt{F_0}}{x} \frac{\sin\left(2\pi \frac{\tau}{T}\right)}{\sin\left(2\pi \frac{\tau}{T} - \phi\right)}, \text{ м/с.} \quad (12)$$

Амплітуда B відхилення осьової швидкості змінюється з часом, що відповідає динамічному мікроклімату. Визначимо початкову фазу ϕ початкової точки A (рис. 2). Для цього схематично розглянемо залежність середньої осьової швидкості $v_{x, \text{сеп}}$, м/с, від поточної координати x , м, і від часу τ , с, у початковій та основній ділянках повітряної струмини. Час τ_A , с, проходження елементарного об'єму повітря струмини від насадки до точки A з координатою x , м, буде початковим моментом часу аксіального коливання v_x , м/с:

$$\tau_A = \frac{x_A}{v}, \text{ с.} \quad (13)$$

Середня швидкість v , м/с, визначалася інтегруванням на проміжку основної ділянки струмини (14):

$$v = \frac{v_{0, \text{сеп}} x_{\text{поч}} + \int_{x_{\text{поч}}}^{x_A} \frac{v_0 m \sqrt{F_0}}{x} dx}{x_A}, \text{ м/с,} \quad (14)$$

де $x_{\text{поч}}$ – довжина початкової ділянки, м.

За формулою (14)

$$v = \frac{v_{0, \text{сеп}}}{x_A} \left(x_{\text{поч}} + m \sqrt{F_0} \ln \left(\frac{x_A}{x_{\text{поч}}} \right) \right), \text{ м/с.} \quad (15)$$

Отже, з урахуванням виразів (13) і (15) початковий момент часу:

$$\tau_A = \frac{x_A^2}{v_{0, \text{сеп}} \left(x_{\text{поч}} + m \sqrt{F_0} \ln \left(\frac{x_A}{x_{\text{поч}}} \right) \right)}, \text{ с.} \quad (16)$$

Початковий момент часу, с, за рівнянням

(16) – це час запізнення коливання осьової швидкості v_x , м/с, відносно початкової швидкості v_0 , м/с. Отже, початкова фаза ϕ з рівнянь (3) і (16):

$$\phi = \frac{2\pi x_A^2}{T v_{0, \text{сеп}} \left(x_{\text{поч}} + m \sqrt{F_0} \ln \left(\frac{x_A}{x_{\text{поч}}} \right) \right)}. \quad (17)$$

Всі значення, необхідні для обчислення змінної з часом осьової швидкості v_x , м/с, в точці A визначаються з двохфакторної залежності $\phi = f(x, \tau)$. При цьому швидкість $v_{x, \text{сеп}}$, м/с, розраховується за рівнянням (10), швидкість $v_{\text{сеп}}$, м/с, – за формулою (3), фаза ϕ – за залежністю (17), а амплітуда B – за рівнянням (12).

Експериментальні дослідження проводилися згідно з методикою [12] за таких умов та спрощень:

- припливний потік повітря усталений;
- повітряні струмини є ізотермічними;
- початкова швидкість повітря в насадку $v = 5 \dots 15$ м/с;
- період зміни швидкості під час експериментальних досліджень був сталим: $T = 960$ с (16 хв);
- витрата повітряного потоку $L = 200 \dots 500$ м³/год.

Швидкість повітря вимірювалася термоелектроанемометром Testo-405 з використанням координатного пристрою з мережею точок 5×5 см. Експериментальні результати подано на рис. 2.

Проведено чисельне моделювання потоку повітря в програмі CFD Ansys FLUENT [11].

Для моделювання в даній програмі було прийнято такі спрощення і припущення:

- повітря є нестисливим;
- потік повітря усталений;
- припливне повітря подавалося двоструминним повітророзподільником ДСПР із утворенням закрученої та плоскої настільної струмин;
- розглянуто розподіл лише повної швидкості в закрученій струмині без розкладання на складові (радіальну, аксіальну і тангенціальну).

Для виведення рівнянь руху вживаються закони збереження маси і енергії, а швидкість зміни трьох компонент імпульсу повинна дорівнювати відповідним компонентам прикладених сил. Рівняння нерозривності:

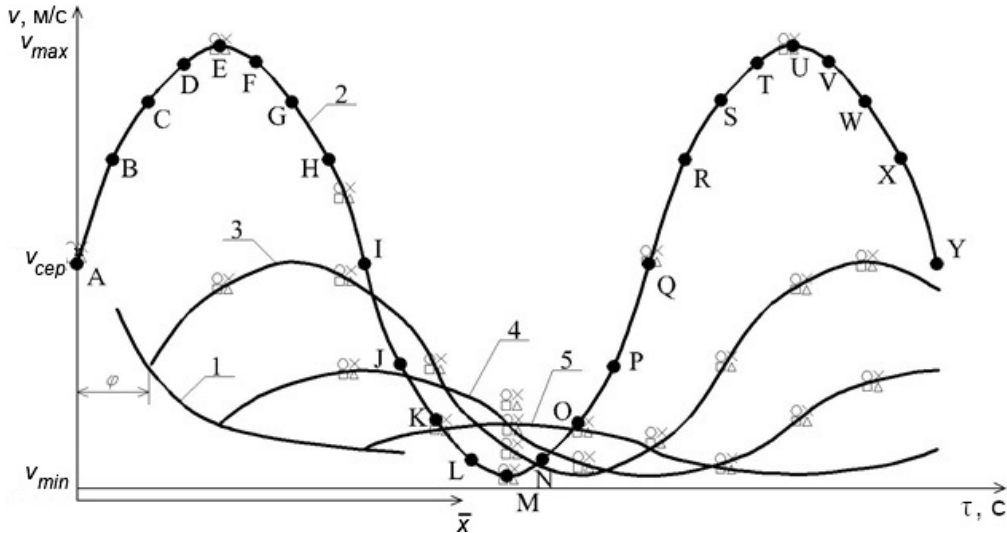


Рис. 2. Результати експерименту:

1 – залежність швидкості повітря від координати за усталеного режиму;
2, 3, 4, 5 – залежності швидкостей повітря від часу в різних координатах (змінний режим)

$$\frac{\partial}{\partial x_1}(\rho u_1) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho u_2) + \frac{\partial}{\partial x_3}(\rho u_3) = 0, \quad (18)$$

де x_i , – координати, м ($i = 1, 2, 3$); u_i – відповідні компоненти швидкості, м/с; ρ – густина повітря, кг/м³,

Для порівняння розглянуто дві моделі турбулентності: двохпараметричну k - ϵ модель та однопараметричну модель Спаларта-Аллмараса. Для цього проведено розрахунок системи рівнянь Нав'є-Стокса, усередненої за Рейнольдсом. Для замикання турбулентності визначено зв'язок між напруженнями за Рейнольдсом і параметрами усередненого потоку за вказаними моделями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_\ell}(\rho u_i u_\ell) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial x_\ell} \left(\mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_\ell} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial x_\ell} \left(\mu_e \frac{\partial u_\ell}{\partial x_i} \right) - g_i(\rho - \rho_0), \quad (19) \end{aligned}$$

де $j = 1 \dots 3$, $\ell = 1 \dots 3$, $i \neq j \neq \ell \neq i$, $\mu_e = \mu + \mu_t$ – загальна в'язкість, Па·с; μ – фізична в'язкість, Па·с; μ_t – турбулентна в'язкість, Па·с, g_i – проекція прискорення від зовнішніх масових сил (у даній задачі – тяжіння) на вісь x_i , ρ_0 – густина навколишнього повітря.

У пакеті Ansys FLUENT транспортні рівняння [17] здійснюваної k - ϵ моделі (*Realizable k- ϵ*

Model) для замикання рівнянь (18) і (19) мають вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \\ + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k; \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \\ + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon; \quad (21) \end{aligned}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\epsilon}},$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}, \quad \tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \epsilon_{ij\ell} \omega_\ell,$$

$$\Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} - \epsilon_{ij\ell} \omega_\ell, \quad A_s = \sqrt{6} \cos(\varphi),$$

$$\varphi = \arccos(\sqrt{6} W), \quad W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3},$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}$$

$$C_1 = \max\left(0, 43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right), \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \quad (22)$$

де k – кінетична енергія турбулентності; ϵ – турбулентна дисипація; S – інваріант тензора деформацій; Y_M – внесок змінного розширення при турбулентності стиснення в зага-

льну швидкість дисипації; $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_2 = 1,9$, $C_{3\varepsilon}$, A_0 – дослідні константи, $\sigma_k = 1,0$ і $\sigma_\varepsilon = 1,2$ – турбулентні числа Прандтля для, відповідно, k та ε ; S_k , S_ε – користувацькі вихідні параметри (user-defined source terms), $\bar{\Omega}_{ij}$ – середній тензор швидкості обертання у обертовій опорній системі відліку з кутовою швидкістю ω_i ; $G_k = \mu_t S$ – продукування турбулентної кінетичної енергії, що утворюється від середніх градієнтів швидкості; $G_b = \beta g_i (\mu_t / Pr_t) (\partial \Theta / \partial x_i)$ – продукування кінетичної енергії силою виштовхування; β – коефіцієнт об’ємного розширення, Pr_t – турбулентне число Прандтля, яке прийняте 0,85, Θ – температура повітря, К.

Поряд з цим проведено аналогічний розрахунок за однопараметричною моделлю турбулентності Спаларта-Аллмараса [18], яка в пакеті ANSYS FLUENT має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{v} u_i) = G_v + \frac{\frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \rho \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right) + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right)^2}{\sigma_{\tilde{v}}} - Y_v + S_{\tilde{v}}; \quad (23)$$

$$\mu_t = \rho \tilde{v} f_{v1}, \quad f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}, \quad \chi = \frac{\tilde{v}}{\nu},$$

$$G_v = C_{b1} \rho \tilde{S} \tilde{v}, \quad \tilde{S} = S + \frac{\tilde{v}}{\kappa^2 d^2} f_{v2},$$

$$f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}, \quad U^* = \sqrt{2 \Omega_{ij} \Omega_{ij}},$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

$$S = |\Omega_{ij}| + C_{prod} \min(0, |S_{ij}| - |\Omega_{ij}|),$$

$$|\Omega_{ij}| = \sqrt{2 \Omega_{ij} \Omega_{ij}}, \quad |S_{ij}| = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}},$$

$$S_{ij} = \frac{\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}{2},$$

$$Y_v = C_{w1} \rho f_w \left(\frac{\tilde{v}}{d} \right)^2, \quad f_w = \tilde{g} \left(\frac{1 + C_{w3}^6}{\tilde{g}^6 + C_{w3}^6} \right)^{\frac{1}{6}},$$

$$\tilde{g} = r + C_{w2} (r^6 - r), \quad r = \frac{\tilde{v}}{\tilde{S} \kappa^2 d^2}, \quad (24)$$

де $\sigma_{\tilde{v}} = 2/3$, $C_{b1} = 0,1355$, $C_{b2} = 0,622$, $\kappa = 0,4187$, $C_{prod} = 2,0$, $C_{v1} = 7,1$, $C_{w2} = 0,3$, $C_{w3} = 2,0$ – дослідні константи; $S_{\tilde{v}}$ – користувацькі вихідні параметри (user-defined source terms); ν – фізи-

чна кінематична в’язкість, м²/с. G_v та Y_v – відповідно, продукування та деструкція турбулентної в’язкості в пристінному шарі через перепони та в’язке гальмування; d – відстань до стіни, м; S – скалярна міра тензора деформацій; S_{ij} – середня швидкість деформації.

Проведено комплексне 4D чисельне моделювання потоку повітря в приміщенні за змінного режиму. Удосконалено метод визначення динамічної зміни розподілу швидкості струмини залежно від часу та координат одночасно. Для вирішення цієї комплексної задачі запропоновано зобразити графік залежності початкової та осьової швидкості від координати та від часу спільно з двома осями абсцис: O_x – координата й O_t – час (рис. 2).

Епюри швидкості залежно від часу фіксувалися з певним його кроком від точки А до точки Q (початок та закінчення періоду коливань швидкості). На рис. 2 ці точки А, В, С тощо позначено з кроком часу в 1/16 періоду T, с: $\tau = T / 16 = 60$ с (1 хв.) Їм відповідає кінематичний ряд динамічної зміни розподілу швидкості тривалістю в повний період коливань, с, – від точки А до точки Q (рис. 3, 4). Осьова швидкість за різних координат залежно від часу (рис. 2, лінії 3, 4 і 5) показано на «стоп-кадрах» кінематичного ряду.

Комплексне 4D числове моделювання у змінному режимі проводилося за моделлю Спаларта-Аллмараса [14, 15] та k - ε моделлю (рис. 3...4). На рис. 3, 4 зображено характерні точки А, В, С і т. д. згідно з рис. 2 та динамічну зміну розподілу швидкості потоку повітря в перерізі ДСПР за змінного режиму.

Розглянуто подачу повітря закрученою і настільною струминами за різних кутів нахилу закручувальних пластин (30° та 60°) та моделей турбулентності. Повний період коливань швидкості завершується в точці Q. Максимум початкової швидкості під час витікання струмини в змінному режимі знаходиться в точці E, її номінальне значення – у точках А, I та Q, а мінімум – у точці M, що узгоджується з відповідними «стоп-кадрами» кінематичного ряду (рис. 3, 4).

Як бачимо з рис. 2, 3, 4, точка R на другому періоді гармонічних коливань початкової швидкості виходу припливної струмини з повітродіподільного пристрою відповідає точці B на першому періоді коливань.

Обидві моделі турбулентності (Спаларта-Аллмараса [14, 15] і k - ε модель) дають задовільну збіжність результатів розрахунку динамічної зміни епюр швидкості.

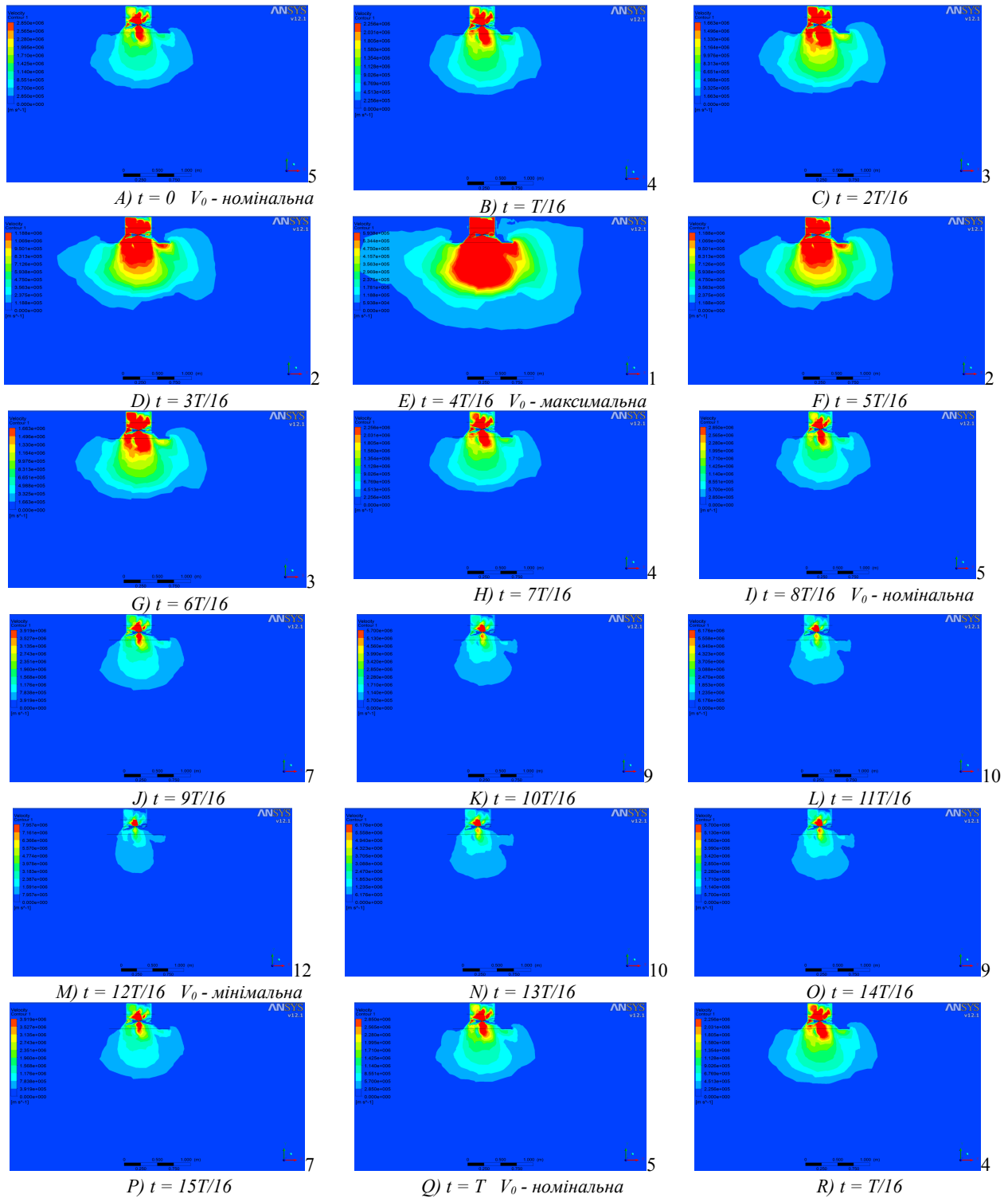


Рис. 3. Розподіл швидкостей за кута нахилу пластин 30° (k - ϵ модель)

Практичне значення результатів:

- результати теоретичних та експериментальних досліджень пристрою ДСПР, а також концепція проектування систем повітророзподілення в приміщеннях у нестационарному режимі, дозволяють ефективно реалізувати уточнену математичну модель у нестационарному режимі та забезпечити необхідні параметри мікроклімату в цих приміщеннях;

- робота має позитивні соціальні наслідки, оскільки призводить до покращення умов праці на робочих місцях і зменшення впливу технологічних процесів на професійні захворювання;
- підвищується енергоощадність системи завдяки створенню динамічного мікроклімату внаслідок періодичного зменшення витрати припливного повітря.

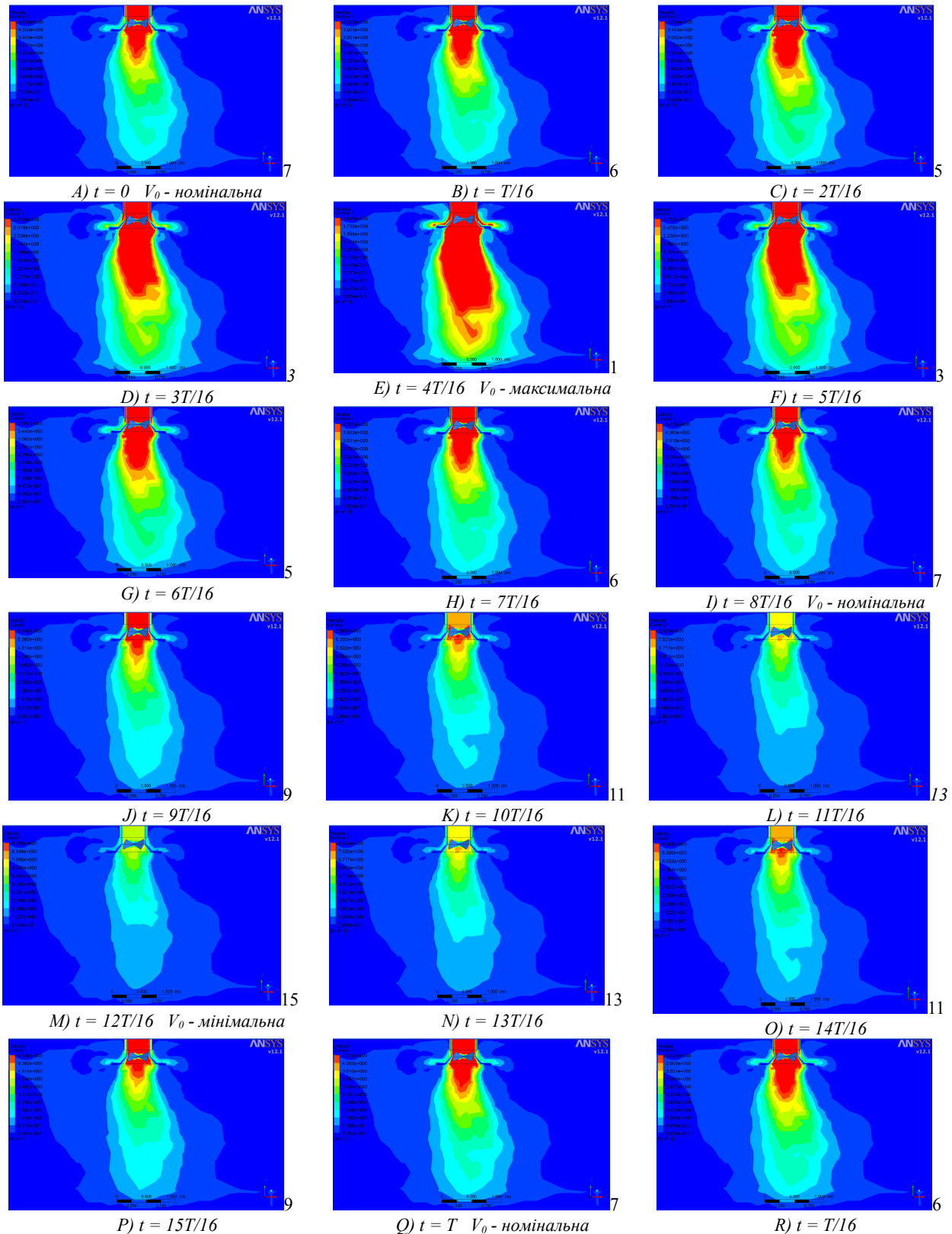


Рис. 4. Розподіл швидкостей за кута нахилу пластин 60° (k - ϵ модель)

Висновки. Запропонований двострумний повітророзподільник забезпечує інтенсивне затухання швидкості та динамічний мікроклімат у приміщенні. Отримано задовільну збіжність між результатами моделювання за k - ϵ

моделлю турбулентності та моделлю Спаларта-Аллмараса, що підтверджує можливість вживання обох моделей для розрахунку струмін від запропонованого повітророзподільника.

Література

1. Vozniak O. Influence of indoor climate on a person heat exchange in a room / O. Vozniak, O. Dovbush // *Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej "Aktualne problemy budownictwa i Inzynierii srodowiska"*; czesc 2. – inzynieria srodowiska, Rzeszow. – 2000. – S. 441 – 447.
2. Возняк О. Т. Вплив параметрів внутрішнього мікроклімату приміщення на теплообмін людини / О. Т. Возняк // *Вісник НУ "ЛП". Теорія і практика будівництва*. – 2010. – № 662. – С. 84 – 88.
3. Voznyak O. Relationship between a Person Heat Exchange and Indoor Climate / O. Voznyak, K. Myroniuk, O. Dovbush // *Proceedings: Selected scientific Papers 10th Rzeszow-Lviv-Kosice Conference. Supplementary Iss. Technical University of Kosice*. – 2005. – P. 148 – 152.
4. Korbut V. Examining a device for air distribution by the interaction of counter non-coaxial jets under alternating mode / V. Korbut, O. Voznyak, K. Myroniuk, I. Sukholova, P. Kapalo // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol 2, № 8 (86) – P. 30-38, ISSN 1729-3774. – <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96774>
5. Возняк О. Динамічний мікроклімат та енергоощадність / О. Возняк // *Вісник Нац. Ун-ту «Львівська політехніка», № 460 «Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація»*. – 2010. – С. 150-153.
6. Voznyak O. Research of device for air distribution with swirl and spread air jets at variable mode / O. Voznyak, I. Sukholova, K. Myroniuk // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. – 2015. – Vol. 6/7 (78). – P.15-23. – <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56235>
7. Kapalo P. Using experimental measurements the concentrations of carbon dioxide for determining the intensity of ventilation in the rooms / P. Kapalo, S. Vilcekova, O. Voznyak // *Chemical Engineering Transactions*. – Vol. 39. – 2014. – P. 1789-1794.
8. Kapalo P. Experimental measurements of a carbon dioxide concentration for determining of a ventilation intensity in a room at pulsing mode / P. Kapalo, O. Voznyak // *Czasopismo Inzynierii Ladowej, Srodowiska i Architektury, tom XXXII, zeszyt 62 (nr 4/2015)*. – P. 201-210. – <http://doi.org/10.7862/rb.2015.189>
9. Возняк О. Т. Підвищення ефективності повітророзподілу у приміщенні при використанні закручених струмин / О. Т. Возняк, І. Є. Сухолова, Х. В. Миронюк // *MOTROL. Motorization and Power industry in agriculture*. – 2010. – Vol. 12. – С. 210-214.
10. Возняк О. Т. Повітророзподіл закрученими струминами у приміщеннях малого об'єму / О. Т. Возняк, І. Є. Сухолова, Х. В. Миронюк // *Вісник НУ "ЛП". Теорія і практика будівництва*. – 2011. – № 697. – С. 60- 63.
11. Возняк О. Т. Моделювання потоку повітря у виробничому приміщенні / О. Т. Возняк, Х. В. Миронюк, І. Є. Сухолова, О. М. Довбуш // *Вісник НУ "ЛП". Теорія і практика будівництва*. – 2015. – № 823. – С. 57-64.
12. Возняк О. Т. Планування експерименту та оптимізація вирішень у вентиляційній техніці: Монографія / О. Т. Возняк. – Львів: Нац. ун-т "Львівська політехніка", 2010. – 220 с.
13. Korbut V. Modeling of supply air flow in a room at variable regime by using both k-ε and Spalart-Allmaras turbulent model / V. Korbut, O. Voznyak, I. Sukholova, K. Myroniuk // *SSP Journal of Civil Engineering. The Journal of TU of Kosice*. – 2017. – Vol. 12. – Iss. 2. – P. 15-22. – <http://doi.org/10.1515/sspjce-2017-0014>
14. Возняк О. Т. Моделювання повітророзподілу в приміщенні у змінному режимі за допомогою моделі турбулентності Спаларта-Алмараса / Возняк О. Т., Сухолова І. Є. // *Вісник НУ "ЛП". Теорія і практика будівництва*. – 2016. – № 844. – С. 26-33.
15. Возняк О. Т., Сухолова І. Є., Миронюк Х. В. Моделювання потоку повітря у приміщенні в нестационарному режимі / Возняк О. Т., Сухолова І. Є., Миронюк Х. В. // *Вісник НУ "ЛП". Теорія і практика будівництва*. – 2017. – № 877. – С. 25-32.
16. Гримитлин М. И. Распределение воздуха в помещениях / М. И. Гримитлин. – Санкт-Петербург.: "АВОК северо-запад", 2004. – 320 с.
17. 4.4 Standard, RNG, and Realizable k-ε Models / ANSYS inc. – Access Mode: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node57.htm>. – Accessed 01.10.2019.
18. 4.3 Spalart-Allmaras Model / ANSYS inc. – Access Mode: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node48.htm>. – Accessed 01.10.2019.

References

1. Vozniak O., Dovbush O. "Influence of indoor climate on a person heat exchange in a room." *Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej "Aktualne problemy budownictwa i Inzynierii srodowiska"*; czesc 2 – inzynieria srodowiska, Rzeszow, 2000. P. 441-447.
2. Vozniak O. "Vplyv parametriv vnutrishnioho mikroklimatu prymishchennia na teploobmin liudyny." *Visnyk NU "LP". Teoriya i praktyka budivnytstva*. 2010. № 662. P. 84-88.
3. Vozniak, Myroniuk K., Dovbush O. "Relationship between a Person Heat Exchange and Indoor Climate." *Proceedings: Selected scientific Papers 10th Rzeszow-Lviv-Kosice Conference. 2005*. Supplementary Iss. Technical University of Kosice. P. 148-152.
4. Korbut V., Vozniak O., Myroniuk K., Sukholova I., Kapalo P. "Examining a device for air distribution by the interaction of counter non-coaxial jets under alternating mode." *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2, № 8 (86), 2017. P. 30-38.5. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96774>

5. Vozniak O. "Dynamichniy mikroklimat ta energooshchadnist." *Visnyk NU "LP". Teoriya i praktyka budivnytstva*. 2010. №460 «Теплоенергетика. Інженерія докількія. Автоматизація». P. 150-153.
6. Vozniak O., Sukholova I., Myroniuk K. "Research of device for air distribution with swirl and spread air jets at variable mode." *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 6/7 (78), 2015. P. 15-23. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56235>
7. Kapalo P., Vilcekova S., Vozniak O. "Using experimental measurements the concentrations of carbon dioxide for determining the intensity of ventilation in the rooms." *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 39, 2014. P. 1789-1794.
8. Kapalo P., Vozniak O. T. "Experimental measurements of a carbon dioxide concentration for determining of a ventilation intensity in a room at pulsing mode." *Czasopismo Inzynierii Ladowej, Srodowiska i Architektury*. T. XXXII, zeszyt 62 (nr 4/2015). P. 201-210. <http://doi.org/10.7862/rb.2015.189>
9. Vozniak O., Sukholova I., Myroniuk K. "Pidvyshchennia efektyvnosti povitrorozpodilu u prymishchenni pry vykorystanni zakrucheneykh strumyn." *MOTROL. Motorization and Power industry in agriculture*". 2010. Vol. 12. P. 210-214.
10. Vozniak O., Sukholova I., Myroniuk K. "Povitrorozpodil zakruchenymy strumynamy u prymishchenni maloho ob'emu." *Visnyk NU "LP". Teoriya i praktyka budivnytstva*. 2011. № 697. P. 60-63.
11. O. Vozniak, K. Myroniuk, I. Sukholova, O. Dovbush. Modeliuvannia potoku povitria u vyrobnychomu prymishchenni // *Visnyk NU "LP". Teoriya i praktyka budivnytstva*. 2015. № 823. P. 57-64.
12. Vozniak O. T. *Planuvannia eksperymentu ta optymizatsiia vyrishennia u ventyliatsiyii tekhnitsi*. Natsionalnyi Universytet "Lvivska politehnika", 2010.
13. Korbut V., Vozniak O., Sukholova I., Myroniuk K. "Modeling of supply air flow in a room at variable regime by using both k-ε and Spalart-Allmaras turbulent model." *SSP Journal of Civil Engineering. The Journal of TU of Kosice*. 2017. Vol. 12. Iss. 2. P.15-22. <http://doi.org/10.1515/sspjce-2017-0014>
14. Vozniak O. T., Sukholova I. Ye. "Modeliuvannia povitrorozpodilu u prymishchenni u zminnomu rezhymi za dopomohoiu modeli turbulentsnosti Spalarta-Allmarasa." *Visnyk NU "LP". Teoriya i praktyka budivnytstva*. 2016. № 844. P. 26-33.
15. Voznyak O. T., Sukholova I., Ye, Myroniuk K., V. "Modeliuvannia potoku povitria u prymishchenni v nestatsionarnomu rezhymi." *Visnyk NU "LP". Teoriya i praktyka budivnytstva*. 2017. № 877. P.25-32.
16. Grimitlin M. I. *Raspreделение vozduha v pomesheniiah*. AVOK severo-zapad, 2004. 320 p.
17. 4.4 Standard, RNG, and Realizable k-ε Models. <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node57.htm>.
18. 4.3 Spalart-Allmaras Model. <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node48.htm>.

УДК 697.922.565; 697.921.47

Математическое моделирование закрученной приточной струи с переменным режимом с использованием различных моделей турбулентности

О. Т. Возняк¹, В. Б. Довгалюк², И. Е. Сухолова³, О. М. Довбуш⁴

¹д.т.н., проф. Кафедра теплогазоснабжения и вентиляции. Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов, Украина, orest.voznyak@l.ua ORCID: 0000-0002-6431-088X

²к.т.н., проф. Кафедра теплогазоснабжения и вентиляции. Киевський Національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, 2280170@ukr.net ORCID: 0000-0002-4836-5354

³к.т.н., асист. Кафедра теплогазоснабжения и вентиляции. Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов, Украина, isukholova@gmail.com ORCID: 0000-0002-3319-2278

⁴ст. преп. Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов, Украина, dovbush.ol@gmail.com ORCID: 0000-0003-0272-6764

Аннотация. Стаття посвящена решению актуальной задачи повышения эффективности воздушораспределения закрученными и настилающимися струями для обеспечения нормируемых параметров воздуха в помещениях. Разработана математическая модель подачи воздуха закрученными и настилающимися струями в этих помещениях. Показано, что для достижения максимальной эффективности воздушораспределения необходимо подавать воздух струями, интенсивно затухающими ещё до входа в рабочую зону. Моделирование потока воздуха осуществлялось с помощью программы CFD Ansys FLUENT. Подано решения как по однопараметрической модели турбулентности Спаларта-Аллмараса, так и к-ε модели. Построены графические и выведены аналитические зависимости на основе проведённых экспериментальных исследований, которые могут быть использованы в последующих инженерных расчётах. Определены динамические параметры воздушного потока, создаваемого закрученными и настилающимися воздушными струями в переменном режиме и формирования динамического микроклимата в помещении. Приведены результаты экспериментальных исследований подачи воздуха в помещение двухпотоковым воздухом.

распределителем, образующим закрученные и настиляющиеся воздушные струи для создания интенсивной турбулентности приточного воздушного потока.

Ключевые слова: распределение воздуха, закрученный поток, настиляющаяся струя, переменный режим, динамический микроклимат, скорость воздуха, скорость потока.

UDC 697.922.565; 697.921.47

Mathematical Simulation of a Twisted Inlet Jet at Variable Mode with Using Various Turbulence Models

O. Vozniak¹, V. Dovhaliuk², I. Sukholova³, O. Dovbush⁴

¹Sc.D, Associate Professor. Institute of Civil and Environmental Engineering, National University "Lviv Polytechnic", Ukraine, orest.voznyak@i.ua ORCID:0000-0002-6431-088X

²PhD, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine, 2280170@ukr.net
ORCID: 0000-0002-4836-5354

³PhD, assistant professor. Institute of Civil and Environmental Engineering, National University "Lviv Polytechnic", Ukraine, isukholova@gmail.com ORCID: 0000-0002-3319-2278

⁴Senior Lecturer, Institute of Civil and Environmental Engineering, National University "Lviv Polytechnic", Ukraine, dovbush.ol@gmail.com ORCID: 0000-0003-0272-6764

Abstract. The article is devoted to the solution of actual task – the efficiency increasing of the air distribution using twisted and wall air jets to provide normative air parameters in premises. The purpose of the paper is to determine the characteristics of air flow that is formed by twisted and flat wall jets at alternating air flow and to obtain analytic equations for determining of needed dynamic parameters of the air jets, and also to design the mathematical model of incoming air flow at the alternating air flow. The mathematical model of air supply with twisted and wall air jets is improved. It is shown that for reaching the maximal efficiency of air distribution it is necessary to supply air by jets that intensively decay before entering into a working zone. Simulation of air flow was carried out using the computational fluid dynamic software Ansys FLUENT. Simulation of the flow are carried out by one-parameter Spalart-Allmaras turbulence model and two-parameter $k-\epsilon$ turbulence model. Good coincidence between the results of simulation using both turbulence models is obtained. The graphical and the analytical dependences on the basis of the conducted experimental research, which can be used in subsequent engineering calculations, are shown. Dynamic parameters of air flow that is formed by the twisted and wall air jets at alternating air flow has been determined. New 4D method of researches is proposed for researching of jets with alternating parameters of the air. Results of experimental investigations of air supply into the room by air distribution device which creates twisted air jets for obtaining more intensive turbulization of air flow in the room are presented. Obtained results of these investigations give possibility to realize engineering calculations of air distribution with twisted and wall air jets.

Keywords: air distribution, twisted jet, wall jet, variable mode, dynamic microclimate, air velocity, flow rate.

Надійшла до редакції / Received 10.07.2019.