

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВІТРОРОЗПОДІЛУ В ПРИМІЩЕННІ У ЗМІННОМУ РЕЖИМІ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛІ ТУРБУЛЕНТНОСТІ СПАЛАРТА - АЛМАРАСА

© Возняк О. Т., Сухолова І. Є., 2016

Розглянуто актуальну задачу підвищення ефективності повітророзподілу закрученими та настильними струминами для забезпечення нормативних параметрів повітря у приміщеннях. Показано, що для досягнення максимальної ефективності повітророзподілу необхідно подавати повітря струминами, що інтенсивно загасають ще до входу в робочу зону. Удосконалено математичну модель подачі повітря закрученими і настильними струминами в цих приміщеннях. Потік повітря змодельовано за допомогою вирішувача CFD FLUENT (Ansys FLUENT). Розраховано систему рівнянь за допомогою однопараметричної моделі турбулентності Спаларта–Алмараса. Зображено подачу повітря в нестационарному режимі в системі кондиціонування повітря закрученою і настильною струминами і визначено їхні параметри в певні проміжки часу. Визначено динамічні параметри повітряного потоку, утвореного закрученою і настильною струминами при їх витіканні в приміщення. Наведено результати теоретичних досліджень сприятливого впливу динамічного мікроклімату на систему терморегуляції людини. Показано, що при динамічному мікрокліматі можливо зменшити затрати на систему кондиціонування або вентиляції. Показано, що організм людини сприятливо реагує на короткотривалі відхилення від нормованих параметрів повітряного середовища.

Ключові слова: повітророзподіл, закручена струмина, настильна струмина, змінний режим, швидкість руху повітря, витрата повітря.

The article is devoted to the decision of actual task of air distribution efficiency increasing with the help of swirl and spread air jets to provide normative parameters of air in the production apartments. The mathematical model of air supply with swirl and spread air jets in that type of apartments is improved. It is shown that for reaching of air distribution maximal efficiency it is necessary to supply air by air jets, that intensively extinct before entering into a working area. Simulation of air flow performed with the help of CFD FLUENT (Ansys FLUENT). Calculations of the equation by using one-parameter model of turbulence Spalarta-Almarasa are presented. The graphical and the analytical dependences on the basis of the conducted experimental researches, which can be used in subsequent engineering calculations, are shown out. Dynamic parameters of air flow that is created due to swirl and spread air jets at their leakage at variable regime and creation of dynamic microclimate in a room has been determined. Results of experimental investigations of air supply into the room by air distribution device which creates swirl air jets for creation more intensive turbulization air flow in the room are presented. Obtained results of these investigations give possibility to realize engineer calculations of air distribution with swirl air jets. The results of theoretical researches of favourable influence of dynamic microclimate to the man are presented. When using dynamic microclimate it's possible to decrease conditioning and ventilation system expenses. Human organism reacts favourably on short lasting deviations from the rationed parameters of air environment.

Key words: air distribution, swirl jet, spread jet, variable regime, air velocity, flow rate.

Постановка проблеми. Відомо, що працездатність людини залежить значною мірою від того, наскільки санітарно-гігієнічні параметри мікроклімату приміщень відповідають її фізіологічним потребам [1, 2]. Фізичний стан повітряного середовища приміщення залежить від температури, вологовмісту, швидкості руху повітря, шуму, запиленості, запахів тощо. На умови комфорту значно впливає саме швидкість руху повітря, величина якої створюється засобами вентиляційної техніки. При виборі способу розподілу повітря слід враховувати специфіку приміщення, його призначення, конструктивні та об'ємно-планувальні особливості, розташування і розміри джерел теплоти, вологи та шкідливих газів, рівень вимог для підтримання розрахункових параметрів мікроклімату.

Одним із раціональних способів повітророзподілу у виробничих приміщеннях, де постійно перебуває робочий персонал, є подача припливного повітря повітророзподільником з високою інтенсивністю загасання параметрів (швидкості V і температури t) припливного повітря з утворенням закрученої і настильної струмин [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із раціональних способів повітророзподілу є подача припливного повітря безпосередньо в робочу зону виробничих приміщень повітророзподільником з утворенням закрученої і настильної струмин. Ці пристрої характеризуються високою інтенсивністю загасання параметрів (швидкості V і температури t) припливного повітря та підвищеною турбулентністю порівняно із прямотечійними струминами [4].

У роботі розглянуто аспект підвищення ефективності повітророзподілення у виробничих приміщеннях, де постійно перебуває виробничий персонал, завдяки високій інтенсивності загасання параметрів повітряного потоку під час розподілу припливного повітря повітророзподільником з утворенням закрученої і настильної струмин у робочій зоні приміщень. Вирішується питання за допомогою ефекту з утворенням закрученої і настильної струмин, які витікають з насадки за певних умов [5].

Мета роботи – вивчити характер розповсюдження повітряного потоку, утвореного закрученою і настильною струминами, визначити та оптимізувати взаємозв'язок між геометричними характеристиками повітророзподільника та інтенсивністю загасання швидкості повітряного потоку. Виконати моделювання припливного повітряного потоку за допомогою моделі турбулентності Спаларта–Алмараса.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо подачу повітря в нестационарному режимі в системі кондиціонування повітря струминою, що розвивається у вільному просторі, і визначимо її параметри [6, 7]. Осьову швидкість V_x у розрахунковій точці A з координатою x_A у випадку усталеного руху (частковий випадок нестационарного режиму) визначають за відомою формулою розрахунку осьової швидкості V_x за відомої початкової V_0 :

$$V_x = V_0 \cdot m \frac{\sqrt{F_0}}{x} \quad (1)$$

При використанні подачі повітря в нестационарному режимі за допомогою відповідного пристрою автоматики (Belimo) початкова швидкість V_0 виходу струмини з певного насадка коливатиметься за періодичним законом, тобто змінюватиметься в межах від $V_{0_{\min}}$ до $V_{0_{\max}}$:

$$V_0 = \bar{V}_0 + A \cdot \sin \omega t, \quad (2)$$

де \bar{V}_0 – середнє значення V_0 за період коливань, м/с; A – амплітуда коливань величини V_0 , м/с; ω – циклічна (колова) частота коливань, s^{-1} ; t – проміжок часу, с.

При цьому величини \bar{V}_0 , A і ω визначають за формулами:

$$\bar{V}_0 = 0,5 \cdot (V_{0\max} + V_{0\min}); \quad (3);$$

$$A = 0,5 \cdot (V_{0\max} - V_{0\min}); \quad (4);$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (5),$$

де T – період коливань, с.

Зауважимо, що за початковий момент часу прийнято витікання потоку з величиною витрати L (а відтак швидкості V), що дорівнюють їх середньому значенню.

Аналогічно запишемо вираз для коливань осьової швидкості V_x з врахуванням $\omega = 2\pi/T$:

$$V_x = \bar{V}_x + B \cdot \sin\left(\frac{2p}{T}t - j\right). \quad (6)$$

Оскільки осьова швидкість V_x запізнюється за фазою порівняно з V_0 , то початкова фаза φ входить до виразу (6) з від'ємним знаком.

Свою чергою, середнє значення осьової швидкості \bar{V}_x та амплітуда її коливань B визначаються аналогічно ((7) і (8)), як і початкові параметри ((3) і (4)):

$$\bar{V}_x = 0,5 \cdot (V_{x\max} + V_{x\min}), \quad (7)$$

$$B = 0,5 \cdot (V_{x\max} - V_{x\min}). \quad (8)$$

На підставі (2), (6) та (1) отримуємо:

$$\bar{V}_x + B \cdot \sin(\omega t - j) = \bar{V}_0 \frac{m\sqrt{F_0}}{x} + A \frac{m\sqrt{F_0}}{x} \cdot \sin \omega t. \quad (9)$$

Оскільки усталений режим є частковим випадком нестационарного (амплітуди коливань $A = 0$ і $B = 0$), то (9) перетворюється на (10) і є аналогічним (1)

$$\bar{V}_x = \bar{V}_0 \frac{m\sqrt{F_0}}{x}. \quad (10)$$

Враховуючи (9) і (10), отримуємо:

$$B \cdot \sin\left(2p \frac{t}{T} - j\right) = A \frac{m\sqrt{F_0}}{x} \cdot \sin 2p \frac{t}{T}, \quad (11),$$

звідки визначаємо амплітуду B :

$$B = A \frac{m\sqrt{F_0}}{x} \cdot \frac{\sin 2p t/T}{\sin(2p t/T - j)}. \quad (12)$$

Експериментальні дослідження проводили за таких умов та спрощень:

- струмини ізотермічні;
- початкова швидкість повітря в припливних насадках у межах: $V = 5 - 15$ м/с;
- період зміни швидкості під час експериментів був постійним: $T_1 = 16$ хв;
- витрата повітря під час експериментів була в межах: $L = 200 - 500$ м³/год.

Заміряли швидкість руху повітря V термоелектроанемометром testo-405 із використанням координатника із сіткою точок 5×5 см.

Результати досліджень наведено на рис. 1.

Зауважимо, що амплітуда B коливань осьової швидкості є змінною в часі, що відповідає умовам динамічного мікроклімату. Визначаємо початкову фазу φ , тобто початковий момент часу для точки т.А. Для цього схематично розглянемо в сукупності залежність середньої осьової швидкості \bar{V}_x від рухомої координати x ($\bar{V}_x = f_1(x)$) та від часу t ($\bar{V}_x = f_2(t)$) на початковій та основній ділянках розвитку струмини.

Час руху t_A елементарного об'єму струмини від насадка до розрахункової точки t . А з координатою x_A буде початковим моментом часу коливання осьової швидкості V_x , (13):

$$t_A = \frac{x_A}{V}, \quad (13)$$

а усереднена швидкість V – інтегруванням на інтервалах початкової і основної ділянок (14):

$$V = \frac{\bar{V}_0 x_{\text{поч}} + \int_{x_{\text{поч}}}^{x_A} \frac{V_0 m \sqrt{F_0}}{x} \cdot dx}{x_A} \quad (14)$$

У результаті інтегрування отримуємо вираз для усередненої швидкості руху струмини V :

$$V = \frac{\bar{V}_0}{x_A} \left(x_{\text{поч}} + m \sqrt{F_0} \cdot \ln \frac{x_A}{x_{\text{поч}}} \right) \quad (15)$$

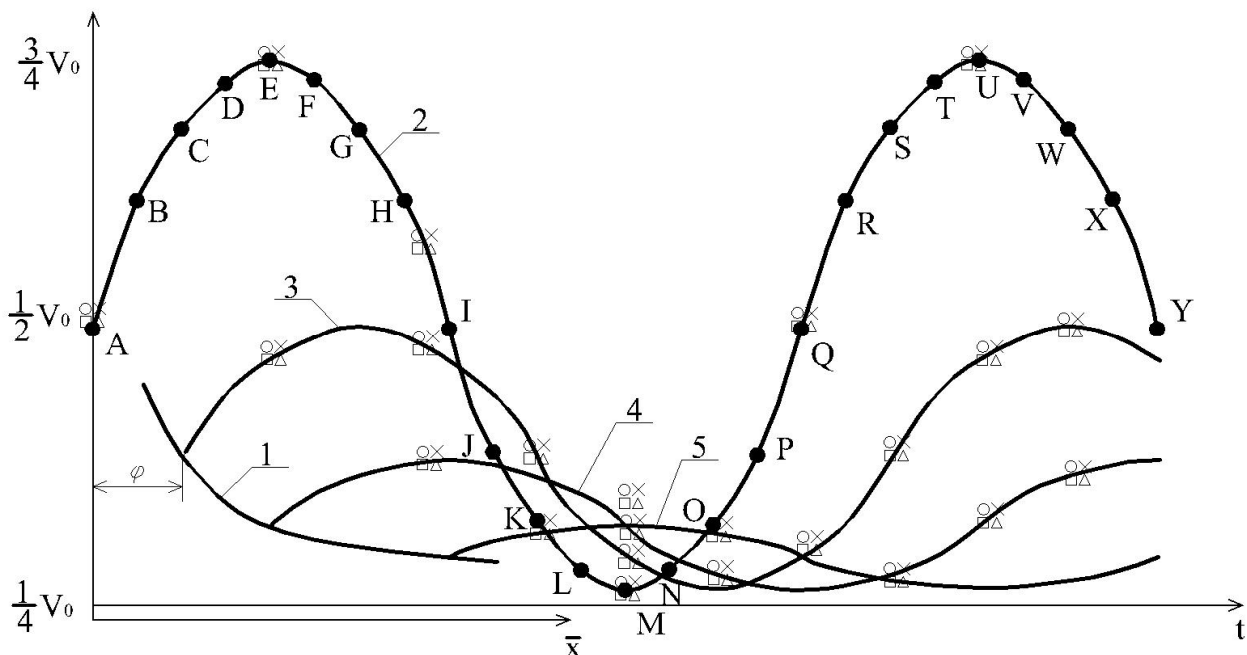


Рис. 1. Результати досліджень:
 1 – залежність швидкості від координати при стаціонарному режимі;
 2, 3, 4, 5 – залежності швидкості від часу
 при різних координатах (нестаціонарний режим)

Отже, з врахуванням (13) і (15) початковий момент часу t_A :

$$t_A = \frac{x_A^2}{\bar{V}_0 \left(x_{\text{поч}} + m \sqrt{F_0} \cdot \ln \frac{x_A}{x_{\text{поч}}} \right)}. \quad (16)$$

Величина t_A , яка визначена з (16), є часом запізнення коливань осьової швидкості V_x за фазою, тому початкову фазу φ отримуємо з (3) і (16):

$$\varphi = \frac{2\pi \cdot x_A^2}{T \cdot \bar{V}_0 \left(x_{\text{поч}} + m \sqrt{F_0} \cdot \ln \frac{x_A}{x_{\text{поч}}} \right)} \quad (17)$$

Отже, визначені всі величини, необхідні для розрахунку змінної в часі осевої швидкості V_x в т. А за формулою (6) як двофакторної залежності $\bar{V}_x = f(x; t)$, а саме: \bar{V}_x – залежність (10), \bar{V}_0 – (3), φ – (17), B – (12).

Моделювання потоку повітря виконувалось за допомогою вирішувача CFD FLUENT (Ansys FLUENT). При моделюванні у цій програмі прийняли такі спрощення і припущення:

- внутрішнє повітря є нестискуваним, а потік повітря – усталеним;
- припливне повітря подавалось повітророзподільником із утворенням закрученої і настільної струмин;
- витяжка із робочої зони здійснювалась витяжним зонтом, а із верхньої зони приміщення була поза зоною дії припливних струмин;
- припливний повітророзподільник встановлено на висоті 3м.

Розраховано систему рівнянь Нав'є–Стокса, усереднену за Рейнольдсом за допомогою однопараметричної моделі турбулентності Спаларта-Алмараса, яка в пакеті Ansys FLUENT має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r\nu) + \frac{\partial}{\partial x_j}(r\nu_i) = G_v + \frac{1}{S_\nu} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (m + r\nu) \frac{\partial \nu}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} r \left(\frac{\partial \nu}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v + S_\nu, \quad (18)$$

де G_v – турбулентна в'язкість; Y_v – руйнування турбулентної в'язкості; S_ν , C_{b2} – константи; ν – молекулярна кінетична в'язкість.

Турбулентна в'язкість визначається:

$$m_t = r\nu_{v1}; \quad (19)$$

$$f_{v1} = \frac{c^3}{c^3 + C_{v1}^3}, \quad (20)$$

де $c \equiv \frac{\nu}{v}$

$$G_v = C_{b1} r \cdot S_\nu, \quad (21)$$

де $S_\nu \equiv S + \frac{\nu}{k^2 d^2} f_{v2}$; $f_{v2} = 1 - \frac{c}{1 + c \cdot f_{v1}}$; C_{b1} , k – константи; S – інваріант тензора деформацій:

$$S \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}, \quad (22)$$

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

$$Y_v = C_{w1} r \cdot f_w \left(\frac{\nu}{d} \right)^2, \quad (23)$$

де $f_w = g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]^{1/6}$; $g = r + C_{w2}(r^6 - r)$; $r \equiv \frac{\nu}{S_\nu^2 d^2}$

де C_{w1} , C_{w2} і C_{w3} – константи: $C_{b1} = 0,1335$, $C_{b2} = 0,622$, $S_\nu = \frac{2}{3}$, $C_{v1} = 7,1$, $C_{w1} = \frac{C_{b1}}{k^2} + \frac{(1 + C_{b2})}{S_\nu}$,

$C_{w2} = 0,3$, $C_{w3} = 2,0$, $k = 0,419$.

Результати моделювання представлено графічно, (рис. 2, 3).

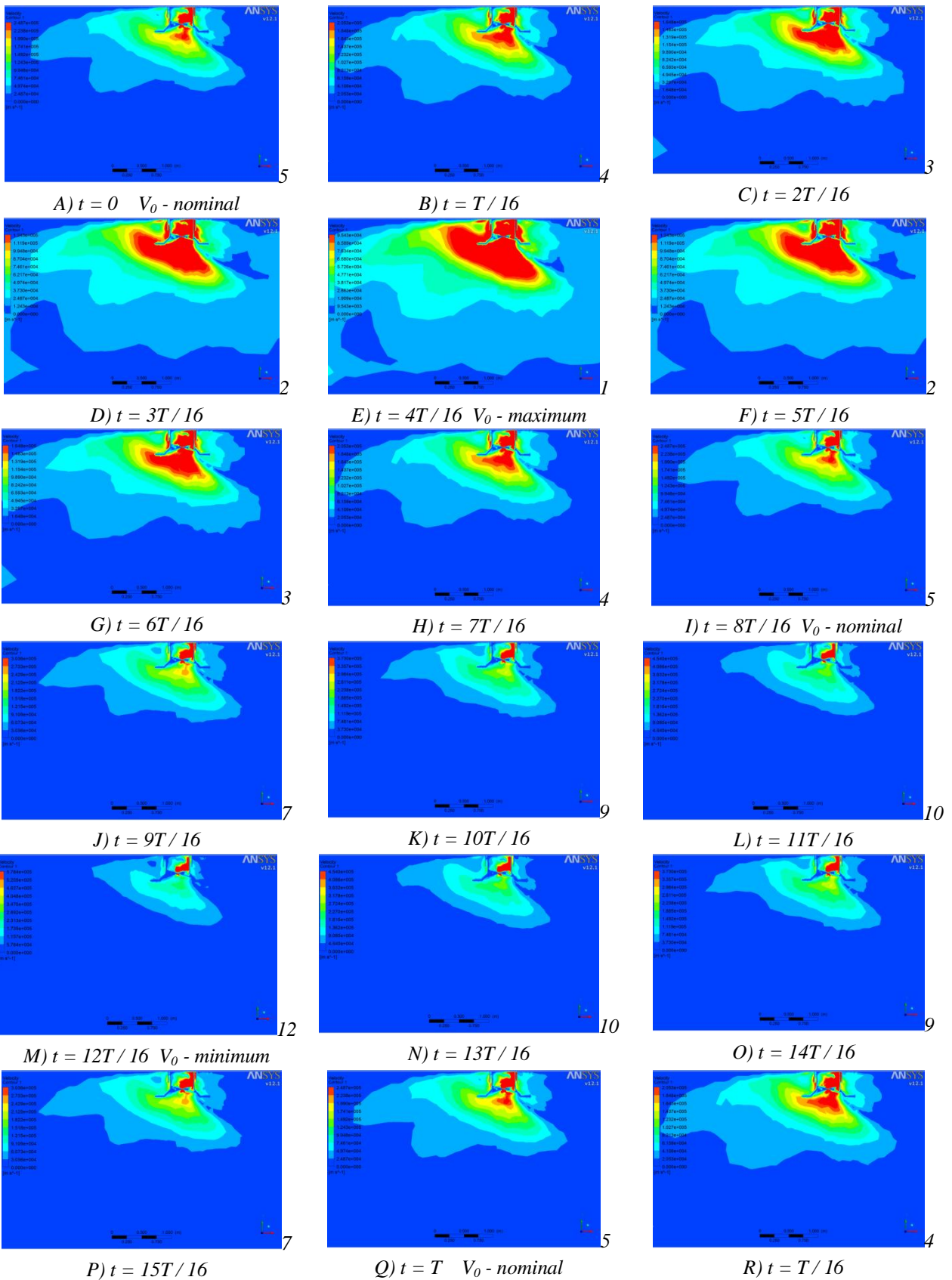


Рис. 2. Епюри швидкостей припливного повітряного потоку в перерізі повітророзподільника при подачі повітря закрученими і настільними струминами при куті нахилу закручувальних пластин 30° і при проміжку часу $t = T/16$ (1 хв) (модель Спаларта–Алмараса)

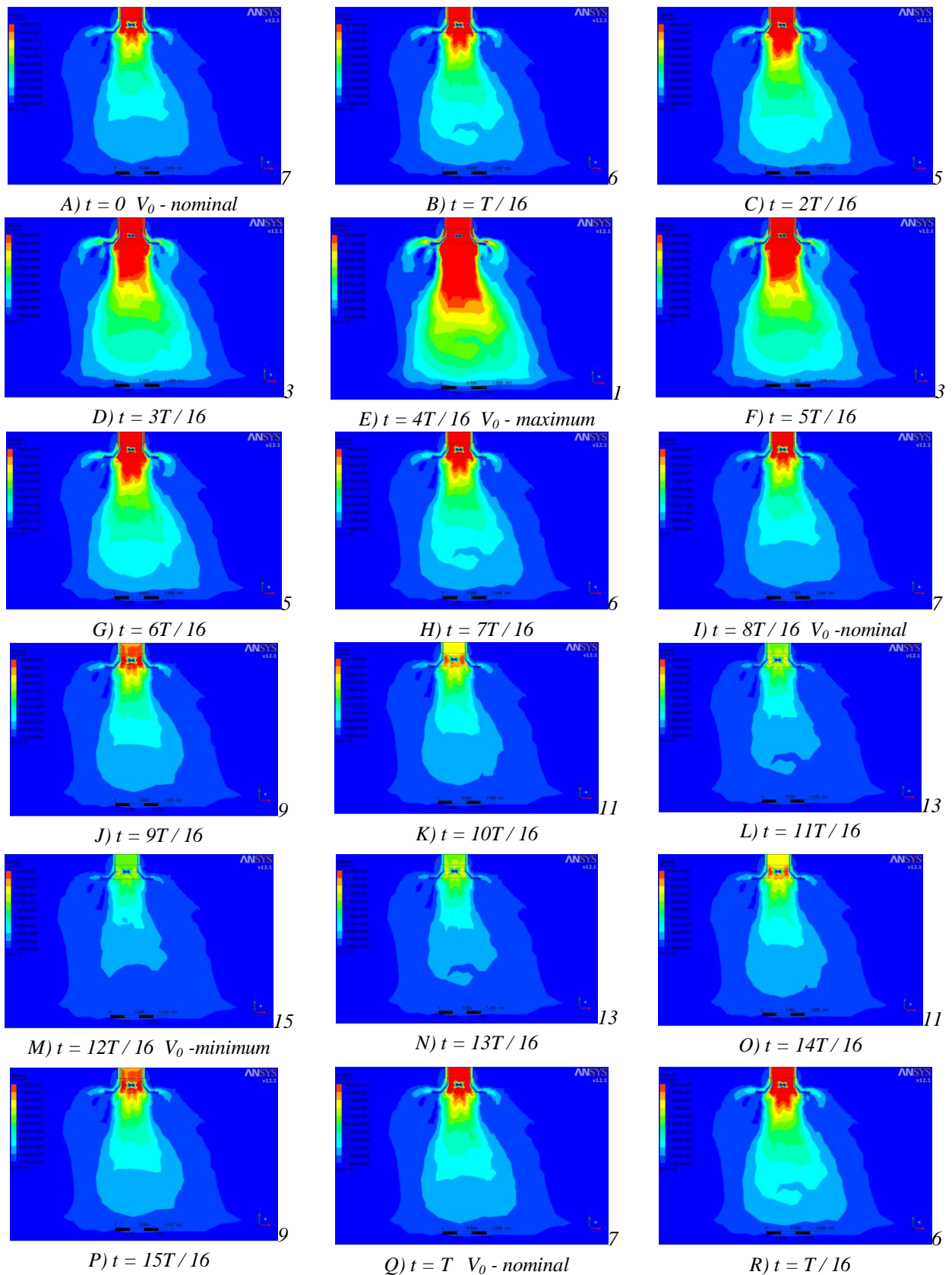


Рис. 3. Етюри швидкостей припливного повітряного потоку в січєнні повітророзподільника при подачі повітря закрученими і настільними струминами при куті нахилу закручувальних пластин 60° і при проміжку часу $t = T/16$ (1 хв) (модель Спаларта–Алмараса)

Висновки: 1. Спостерігається суттєве збільшення швидкостей на закручувальних пластині, що свідчить про значну турбулізацію повітряного потоку при потрапленні на них.

2. Визначено, що для підвищення інтенсивності загасання швидкості руху потоку повітря \bar{V} необхідно збільшити кут нахилу закручувальних пластин і застосувати ефект настилання.

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. – S. 441–447.* 2. *Миронюк Х. В., Сухолова І. Є. Вплив параметрів внутрішнього мікроклімату приміщення на теплообмін людини. Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія докiлля. Автоматизація". – 2010. – № 677. – С. 54–56.* 3. *Гримитлин М. И. Распределение воздуха в помещениях. – М.: Стройиздат, 1982. – 163 с.* 4. *Патент на корисну модель № 40185. Бюл. № 6, 25.03.2009. UA F24F 13/06. Повітророзподільник / Возняк О.Т., Сухолова І.Є. // Промислова власність. – 2009.* 5. *Возняк О. Т., Сухолова І. Є., Миронюк Х. В. Дослідження пристрою для повітророзподілу закрученими і настільними струминами у змінному режимі // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – 6 (7). – С. 15–23.* 6. *Мальгин Ю. В. Создание эффективного динамического микроклимата в помещении // Инженерные системы. АВОК-Северо-Запад, № 3 (41), 2009. – С. 42–46.* 7. *Voznyak O., Myroniuk K., Sukholova I. (2011). Energy saving at creation of dynamic indoor climate in a room. Current issues of Civil and Environmental Engineering in Kosice, Lviv and Rzeszow. XIII international scientific conference. Kosice.*