

## МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКУ ПОВІТРЯ У ПРИМІЩЕННІ В НЕСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ

© Возняк О. Т., Сухолова І. Є., Миронюк Х. В., 2017

Розглянуто актуальну задачу підвищення ефективності повітророзподілу закрученими та настільними струминами для забезпечення нормативних параметрів повітря у приміщеннях. Показано, що для досягнення максимальної ефективності повітророзподілу необхідно подавати повітря струминами, що інтенсивно затухають ще до входу в робочу зону. Моделювання потоку повітря виконано за допомогою вирішувача CFD FLUENT (Ansys FLUENT). Проведено розрахунок системи рівнянь за допомогою k-ε моделі турбулентності. Представлено подачу повітря в нестационарному режимі в системі кондиціонування повітря закрученою і настільною струминами, і визначено їхні параметри в певні проміжки часу. Показано, що при динамічному мікрокліматі можливими є зменшення затрат на систему кондиціонування або вентиляції. Показано, що організм людини сприятливо реагує на короткотривалі відхилення від нормованих параметрів повітряного середовища.

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

O. Voznyak, I. Sukholova, Kh. Myroniuk  
Lviv Polytechnic National University,  
Department of Heat and Gas Supply and Ventilation

## MODELING INDOOR AIR FLOW IN THE UNSTEADY MODE

©Voznyak O., Sukholova I., Myroniuk Kh., 2017

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. 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 k-ε model of turbulence 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.

**Вступ.** Одним із раціональних способів повітророзподілу у виробничих приміщеннях, де постійно перебуває робочий персонал, є подача припливного повітря повітророзподільником з високою інтенсивністю затухання параметрів (швидкості  $V$  і температури  $t$ ) припливного повітря з

утворенням закрученої і настильної струмин. Дослідження у приміщеннях і громадських, і промислових будинків свідчать про те, що на тепловідчуття людини сприятливо впливають саме змінні подразники [1]. Змінний режим витікання припливних струмин означає створення динамічного мікроклімату і на терморегуляції організму людини відображається позитивно. По суті, людина піддається дії динамічного мікроклімату, постійно перебуваючи у природних умовах, а відтак звикла до нього в постійні коливання температури, рухомості повітря та його вологості. Звідси є очевидною доцільність періодичного створення динамічного мікроклімату також у закритих приміщеннях.

**Огляд наукових джерел і публікацій.** У цій роботі розглянуто аспект підвищення ефективності повітророзподілення у виробничих приміщеннях за рахунок створення динамічного мікроклімату.

Дослідження [2, 3] показали, що забезпечення обмежених у часі періодичних відхилень параметрів мікроклімату дає можливість забезпечити вимоги складного технологічного процесу, а з гігієнічного погляду – зменшити негативний вплив монотонної праці на самопочуття людини і збільшити продуктивність праці [4].

Під динамічним мікрокліматом розуміють різні види можливої (або необхідної) зміни параметрів у часі, що триває від часток секунди (для турбулентної пульсації повітряних потоків) до доби або цілого періоду року. Динамічний мікроклімат можна охарактеризувати як поєднання параметрів, представлених середніми значеннями і величинами відхилень за визначений відрізок часу. Характерною особливістю динамічного мікроклімату є нормування часу відхилення параметрів або закон їхньої зміни в часі [5].

Основним завданням системи зі змінною витратою є використання витрати повітря в системі, чи її частині, як основного впливу з метою раціонального використання енергозатрат і капіталовкладень. Змінність витрати повітря є найважливішою ознакою системи із змінною витратою, тобто таким чином створюється нестационарний режим повітророзподілення. Інші параметри так не впливають на систему, умови її проектування і роботу. Витрата повітря істотно впливає на вибір обладнання.

**Мета та завдання дослідження** полягає у вивченні характеру розповсюдження повітряного потоку, утвореного закрученою і настильною струминами, визначити та оптимізувати взаємозв'язок між геометричними характеристиками повітророзподільника та інтенсивністю затухання швидкості повітряного потоку, а також визначити динамічні параметри струмини при її витіканні в нестационарному режимі із створенням динамічного мікроклімату в приміщенні.

**Теоретичні дослідження.** Розгляньмо подачу повітря в нестационарному режимі в системі кондиціонування повітря струминою, що розвивається у вільному просторі, і визначимо її параметри. Осьова швидкість  $V_x$  у розрахунковій точці А з координатою  $x_A$  у випадку усталеного руху (частковий випадок нестационарного режиму) визначається відомою формулою розрахунку осьової швидкості  $V_x$  при відомій початковій  $V_0$  [2]:

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

При використанні подачі повітря в нестационарному режимі з допомогою відповідного пристрою автоматики (Belimo) початкова швидкість  $V_0$  виходу струмини з певного насадка коливатиметься за періодичним законом: тобто буде змінюватись 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; А – амплітуда коливань величини  $V_0$ , м/с;  $\omega$  – циклічна (колова) частота коливань,  $c^{-1}$ ; t – проміжок часу, с. При цьому величини  $\bar{V}_0$ , А і  $\omega$  визначаються за такими відомими 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 їхньому 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  $\phi$  входить у вираз (6) з від'ємним знаком.

Своєю 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 нестационарної амплітуди коливань  $A = 0$  і  $B = 0$ ), то (9) перетворюється в (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  $B$ :

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

**Власні експериментальні дослідження.** Експериментальні дослідження проводили за таких умов та спрощень:

- струмини ізотермічні;
- початкова швидкість повітря в припливних насадках перебувала в межах:  $V = 5 - 15$  м/с.
- період зміни швидкості при експериментах був постійним:  $T_1 = 16$  хв;
- витрата повітря при експериментах була в межах:  $L = 200 - 500$  м<sup>3</sup>/год.

Заміри швидкості руху повітря  $V$  здійснювалися термоелектроанемометром testo-405 із використанням координатника із сіткою точок  $5 \times 5$  см. Результати досліджень наведені на рис. 1.

Зауважимо, що амплітуда  $B$  коливань осьової швидкості є змінною в часі, що відповідає умовам динамічного мікроклімату. Визначаємо початкову фазу  $\phi$ , тобто початковий момент часу для точки  $t_A$ . Для цього схематично розглянемо в сукупності залежність середньої осьової швидкості  $\bar{V}_x$  від біжучої координати  $x$  ( $\bar{V}_x = f_1(x)$ ) та від часу  $t$  ( $\bar{V}_x = f_2(x)$ ) на початковій та основній ділянках розвитку струмини [6, 7]. Час руху  $t_A$  елементарного об'єму струмини від насадки до розрахункової точки  $t_A$  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):

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

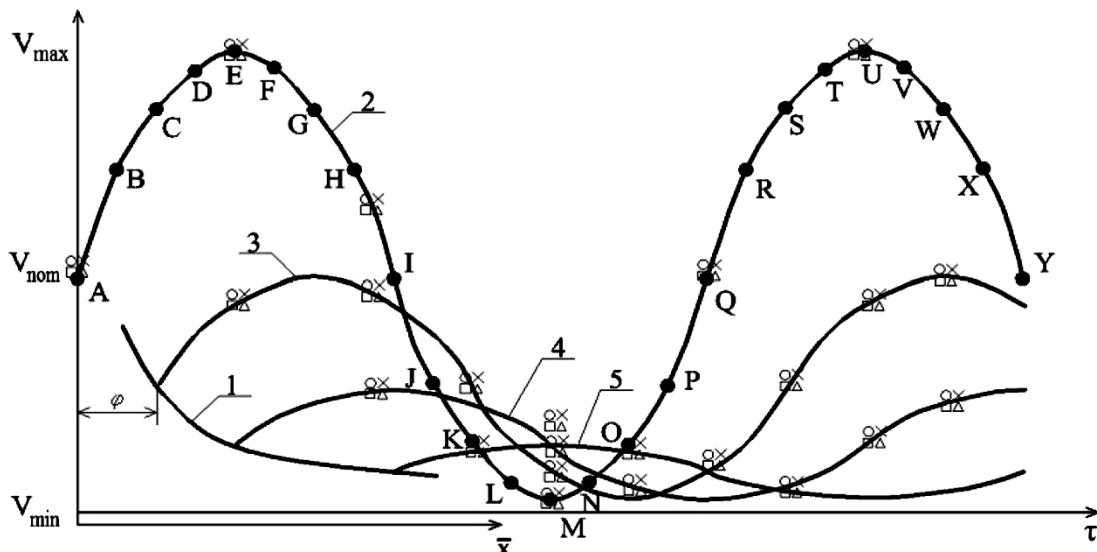


Рис. 1. Результати досліджень: 1 – залежність швидкості від координати при стаціонарному режимі; 2, 3, 4, 5 – залежності швидкості від часу при різних координатах (нестационарний режим)

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

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

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  $\varphi$  отримуємо з (3) і (16):

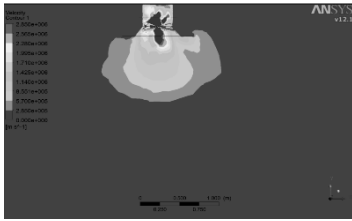
$$\varphi = \frac{2\pi \cdot x_A^2}{T \cdot \bar{V}_0 \left( x_{\text{поч}} + m \sqrt{F_0} \cdot \ln \frac{x_A}{x_{\text{поч}}} \right)} \quad (17)$$

Отже, визначені всі величини, необхідні для розрахунку змінної в часі осьової швидкості  $V_x$  у 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),  $\varphi$  – (17),  $B$  – (12).

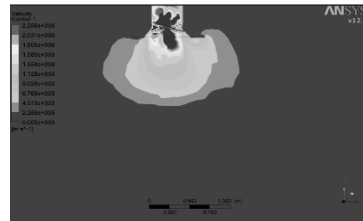
Поряд із цим викликає інтерес енергетична оцінка системи кондиціонування повітря.

Моделювання потоку повітря виконувалось за допомогою вирішувача CFD FLUENT (Ansys FLUENT). Під час моделювання у цій програмі було прийнято такі додаткові умови та спрощення:

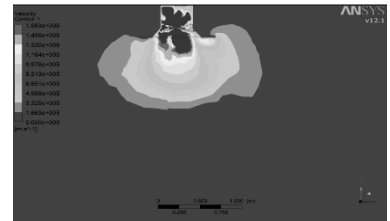
- внутрішнє повітря є нестискуваним, а рух потоку повітря – нестационарним;
- тепловіддача від внутрішніх поверхонь не враховувалась;
- припливне повітря подавалось повітророзподільником із утворенням закрученої і настільної струмин;
- припливний повітророзподільник встановлено на висоті 3 м.



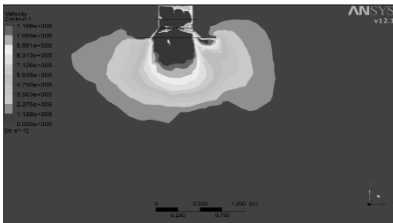
A)  $t = 0V_0$  – номінальна



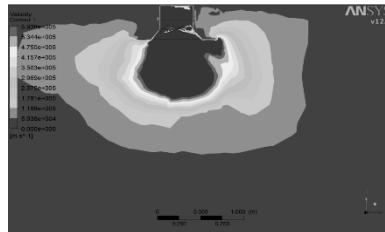
B)  $t = T/16$



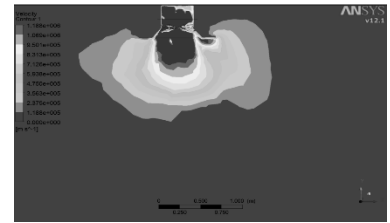
C)  $t = 2T/16$



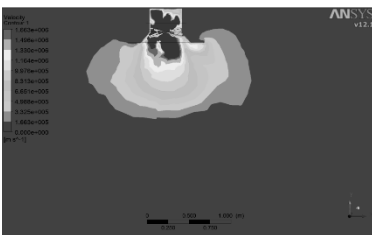
D)  $t = 3T/16$



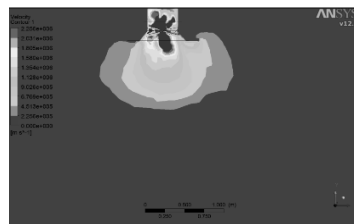
E)  $t = 4T/16V_0$  – максимальна



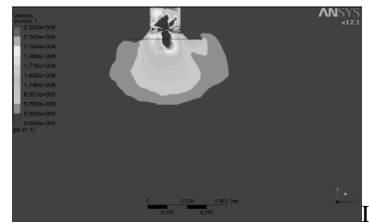
F)  $t = 5T/16$



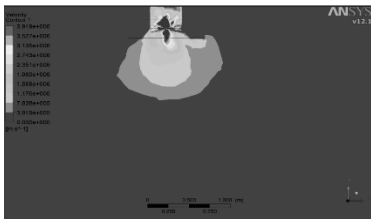
G)  $t = 6T/16$



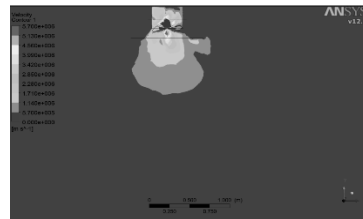
H)  $t = 7T/16$



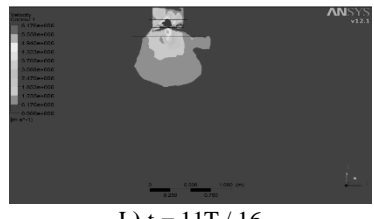
I)  $t = 8T/16V_0$  – номінальна



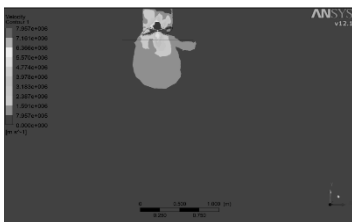
J)  $t = 9T/16$



K)  $t = 10T/16$



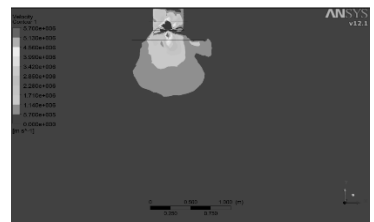
L)  $t = 11T/16$



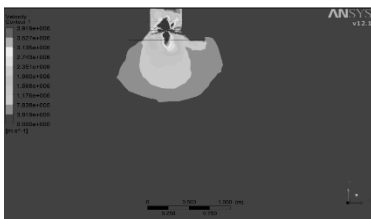
M)  $t = 12T/16V_0$  – мінімальна



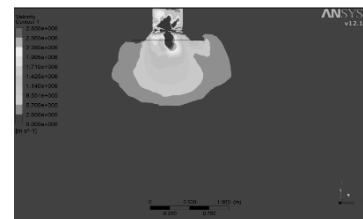
N)  $t = 13T/16$



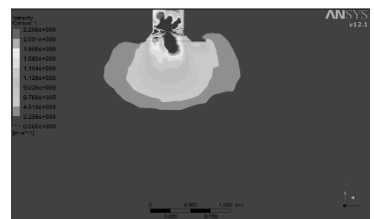
O)  $t = 14T/16$



P)  $t = 15T/16$



Q)  $t = TV_0$  – номінальна



R)  $t = T/16$

Рис. 2. Розподіл швидкостей припливного повітряного потоку у перерізі повітророзподільника при подачі повітря закрученою і настільною струминами при куті нахилу закручувальних пластин  $30^\circ$  з кроком часу  $t = T/16$  (1 хв.) *k – e* модель

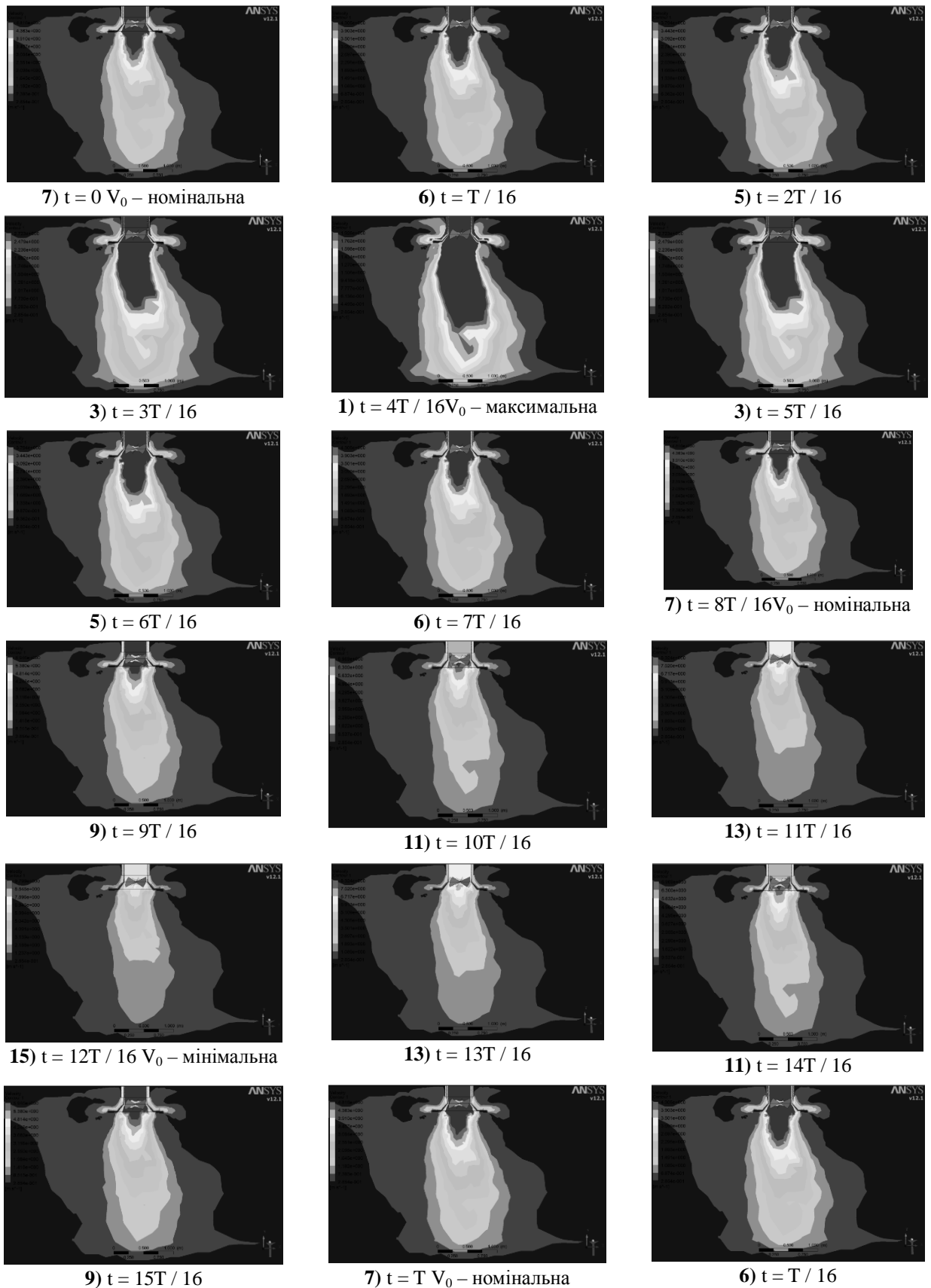


Рис. 3. Розподіл швидкостей припливного повітряного потоку у перерізі повітродозподільника при подачі повітря закрученою і настільною струминами при куті нахилу закручувальних пластин  $60^\circ$  з кроком часу  $t = T/16$  (1 хв) ( $k$  –  $\epsilon$  модель)

Для виведення рівняння руху необхідно, щоб виконувались закони збереження маси і енергії, а швидкість зміни трьох компонент імпульсу була рівна відповідним компонентам прикладених сил. Розглянуто  $k - \epsilon$  модель турбулентності. Для замикання турбулентності, визначено зв'язок між напруженнями за Рейнольдсом і параметрами усередненого потоку за допомогою різних моделей турбулентності [8].

У пакеті Ansys FLUENT рівняння  $k - \epsilon$  моделі відповідно мають вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(rk) + \frac{\partial}{\partial x_j}(rkU_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( m + \frac{m_t}{s_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - re - Y_M + S_k \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(re) + \frac{\partial}{\partial x_j}(reU_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( m + \frac{m_t}{s_e} \right) \frac{\partial e}{\partial x_j} \right] + rC_1 S_e - rC_2 \frac{e^2}{k + \sqrt{ve}} + C_{1e} \frac{e}{k} C_{3e} G_b + S_e \quad (19)$$

Проведено розрахунок системи рівнянь Нав'є-Стокса, усередненої по Рейнольдсу за допомогою  $k - \epsilon$  моделі турбулентності [9,10].

Вперше проведено комплексне 4D числове моделювання потоку повітря в приміщенні у змінному режимі. При цьому розроблено метод визначення динамічної зміни розподілу швидкостей струмини залежно і від часу, і координат одночасно, в комплексі. Тому для вирішення цієї комплексної задачі запропоновано зобразити графік залежності початкової та осьової швидкості від координати та від часу спільно з двома осями абсцис:  $Ox$  – координата і  $Ot$  – час (рис. 1). Епюри швидкостей залежно від часу фіксувати з певним його кроком, починаючи з точки  $A$ , (початок періоду коливань швидкості) і завершуючи точкою  $Q$  (закінчення періоду коливань швидкості). На рис. 1 ці точки  $A, B, C$  і т.д. позначено з кроком часу в  $1/16$  періоду  $T$ . Їм відповідає кінематичний ряд динамічної зміни розподілу швидкостей тривалістю у півперіоду – від точки  $A$  до точки  $I$  (рис. 2; 3). Значення осьової швидкості при різних координатах залежно від часу (лінії 3, 4, 5 рис. 1) показано на цих самих “стоп-кадрах” кінематичного ряду. При цьому числове моделювання проводилось за допомогою  $k-\epsilon$  моделі турбулентності.

Повний період коливань швидкості завершується у точці  $Q$ . Максимум початкової швидкості при витіканні струмини у змінному режимі перебуває у точці  $E$ , її номінальні значення – в точках  $A, I$  та  $Q$ , а мінімум – у точці  $M$ , що узгоджується з відповідними “стоп-кадрами” кінематичного ряду (рис. 2; 3). Як бачимо з рис.1, точка  $R$  на другому періоді гармонічних коливань початкової швидкості виходу припливної струмини з повітророздавального пристрою відповідає точці  $B$  на першому періоді коливань.

Порівнюючи динамічні зміни епюр швидкостей за кутів нахилу закручувальних пластин  $30^0$  та  $60^0$  при числовому моделюванні за допомогою  $k - \epsilon$  моделі турбулентності, бачимо задовільну збіжність результатів і по закрученій, і по плоскій настільній струмині.

**Висновки.** На основі отриманих результатів констатуємо:

1. Запропоновано повітророзподільник для забезпечення динамічного мікроклімату у приміщенні;
2. За рахунок створення динамічного мікроклімату доцільно зменшити кількість припливного повітря системою вентиляції при дотриманні нормативних вимог;
3. Спостерігається суттєве збільшення швидкостей на закручувальних пластинах, що свідчить про турбулізацію повітряного потоку при потраплянні на них;
4. Визначено та оптимізовано геометричні та витратні характеристики повітророзподільника з утворенням закрученої і настільної струмин;
5. Визначено, що для досягнення підвищення інтенсивності затухання швидкості руху потоку повітря  $\bar{V}$  необхідно зменшити кут нахилу закручувальних пластин з  $60$  до  $30$  і застосувати ефект настилення;
6. Застосування повітророзподільників з утворенням закрученої і настільної струмин дасть змогу значно підвищити критерій ADPI [2] при подачі у виробничі приміщення значної кількості

повітря, необхідної для забезпечення санітарно-гігієнічних параметрів мікроклімату приміщень та технологічності виробничих процесів, що відбуваються в цих приміщеннях;

7. При застосуванні повітророзподілу в нестационарному режимі можна досягнути економії холоду, яка визначається початковою швидкістю виходу припливної струмини  $\bar{V}_0$  та амплітудою її коливань.

1. Талиев В. Н. *Аэродинамика вентиляции*. – М., Стройиздат 1978, – 274 с. 2. Гримитлин М. И. *Распределение воздуха в помещениях*. – М., Стройиздат 1982, – 163 с. 3. Банхиди Л. *Тепловой микроклимат помещений*. – М.: Стройиздат, 1981. – 248 с. 4. 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 r. – S. 441–447. 5. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. – М., Наука, 1976. – 279 с. 6. Губернский Ю. Д., Исмаилова Д. И. *Экономия энергии и топлива при управлении микроклиматом // Водоснабжение и санитарная техника*. – 1985. – № 3. – С. 11–12. 7. Возняк О. *Динамічний мікроклімат та енергоощадність // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2010. – № 460 “Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація”. – С. 150–153. 8. Хомутецкий Ю. Н., Куксинская Т. В. *Комфортный динамический микроклимат в помещениях // Водоснабжение и сан. техника*. – 1979. – № 5. 9. Зерцалов Н. С. *Пути совершенствования СКВ на основе динамического микроклимата*. – В кн.: *Совершенствование и повышение эффективности СКВ промышленных и гражданских зданий*. – Л.: ЛДНТП, 1981. 10. Мальгин Ю. В. *Создание эффективного динамического микроклимата в помещении // Инженерные системы. АВОК-Северо-Запад, № 3 (41), 2009*. – С. 42–46.

#### References

1. Talyev V. N. *Aerodynamyka ventylyatsyy*. – М., Stroyizdat 1978, – 274 s. 2. Hrymytlyn M. Y. *Raspredelenye vozdukha v pomeshchenyakh*. – М., Stroyizdat 1982, – 163 s. 3. L. Bankhidy. *Teplovoy mykroklymat pomeshchenyy*. – М.: Stroyizdat, 1981. – 248 s. 4. O. Vozniak, O. Dovbush. *Influence of indoor climate on a person heat exchange in a room. Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej “Aktualne problem budownictwa I Inzynierii srodowiska”*; czesc 2 – inzynieria srodowiska”, Rzeszow, 2000 r. – S. 441–447. 5. Adler Yu.P., Markova E. V., Hranovskyy Yu. V. *Planyrovanye eksperymenta pry poyske optymal’nykh uslovyu*. – М., Nauka, 1976. – 279 s. 6. Yu. D. Hubernskyy, D. Y. Ysmaylova. *Ekonomyya enerhyu y toplyva pry upravlenyy mykroklymatom*. – *Vodosnabzhenye y sanytarnaya tekhnika*, 1985, # 3. – S. 11–12. 7. O. Voznyak. *Dynamichnyy mikroklimat ta enerhooshchadnist’*. – *Visnyk Nats. Untu “L’vivs’ka politekhnika” #460 “Teploenerhetyka. Inzheneriya dovkillya. Avtomatyziatsiya”*, 2010. – S. 150–153. 8. Khomutetsky Yu.N., Kuksynskaya T. V. *Komfortnyy dynamychesky mykroklymat v pomeshchenyakh // Vodosnabzhenye y san. tekhnika*, 1979, #5. 9. Zertsalov N. S. *Puty sovershenstvovanyya SKV na osnove dynamycheskoho mykroklymata*. – V kn.: *Sovershenstvovanye y povyshenye efektyvnosti SKV promyshlennykh y hrazhdanskykh zdanyu*. L.: LDNTP. 1981. 10. Mal’hin Yu. V. *Sozdanye efektyvnoho dynamycheskoho mykroklymata v pomeshchenyy*. *Ynzhenernyye systemy. AVOK-Severo-Zapad, #3 (41), 2009*. – S. 42–46.