

О. Т. Возняк, Х. В. Миронюк, І. Є. Сухолова, О. М. Довбуш  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра теплогазопостачання і вентиляції

## МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКУ ПОВІТРЯ У ВИРОБНИЧОМУ ПРИМІЩЕННІ

© Возняк О. Т., Миронюк Х. В., Сухолова І. Є., Довбуш О. М., 2015

Розглянуто повітророзподілення в приміщенні з утворенням закрученої і настильної струмин. Визначено динамічні параметри повітряного потоку, утвореного закрученою і настильною струминами під час їх витікання в приміщення. Припливна закручена струмина за кута нахилу закручувальних пластин  $90^\circ$  близька за своїми характеристиками до прямої. Настильна струмина розвивається незалежно від закрученої, тобто немає взаємодії струмин. За кута нахилу закручувальних пластин  $60^\circ$  припливна настильна струмина теж розвивається незалежно від закрученої, тобто немає взаємодії струмин. За кута нахилу закручувальних пластин  $30^\circ$  відбувається взаємодія закрученої і настильної струмин.

Моделювали потік повітря за допомогою вирішувача CFD FLUENT (Ansys FLUENT). Під час моделювання у цій програмі було прийнято такі спрощення і припущення: внутрішнє повітря є нестискуваним, а потік повітря – усталеним, тепло-віддача від внутрішніх поверхонь не враховувалась, нагрівання повітря у приміщенні в холодний період року забезпечувався радіаторами, припливне повітря подавалось повітророзподільником із утворенням закрученої і настильної струмин, витяжка із робочої зони здійснювалась витяжним зонтом, а із верхньої зони приміщення – була поза зоною дії припливних струмин, припливний повітророзподільник встановлено на висоті 3 м.

**Ключові слова:** повітророзподілення, закручена струмина, настильна струмина, швидкість руху повітря, витрата.

Air distribution in a room by swirl and spread air jets has been regarded. Dynamic parameters of air flow that is created due to swirl and spread air jets at their leakage in a room has been determined. Jet spun at an angle of inclination jet twisting plates  $90^\circ$  similar in its characteristics to upstream. Grazing jet develops independently of swirling, ie no jets interaction. At an angle of  $60^\circ$  tilt plate twisting jet flooring jet also develops independently of swirling, ie no jets interaction. At an angle of inclination of the plate twisting  $30^\circ$  the interaction swirling and grazing jets.

Simulation of airflow was performed using solver CFD FLUENT (Ansys FLUENT). In the simulation of the program was taken following simplifications and assumptions: internal air is incompressible, and the flow of air – established, heat from internal surfaces are not taken into account, heating the air in the room during the cold period of the year provided radiators, air supply air was applied to form the swirling and grazing jets, extract from the working area was carried out exhaust umbrellas, and from the upper zone of the room – was out of range of tidal jets, tidal Air is set at a height of 3m.

**Key words:** air distribution, swirl jet, spread jet, 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. Фізичний стан повітряного середовища приміщення залежить від температури, вологовмісту, швидкості руху повітря, шуму, запиленості, запахів тощо. На умови комфорту значний вплив має саме швидкість

руху повітря, величина якої створюється засобами вентиляційної техніки. Значний вплив на тепловий комфорт людини має також початкова турбулізація припливного повітряного потоку під час його виходу з насадка [1–9].

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

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Найраціональнішим способом повітророзподілу є подавання припливного повітря безпосередньо в робочу зону виробничих приміщень повітророзподільником з утворенням закрученої і настильної струмин. Ці пристрої характеризуються високою інтенсивністю погасання параметрів (швидкості  $V$  і температури  $t$ ) припливного повітря та підвищеною турбулентністю порівняно із прямотечійними струминами.

У роботі розглядається аспект підвищення ефективності повітророзподілення у виробничих приміщеннях, де постійно перебуває виробничий персонал, за рахунок досягнення високої інтенсивності погасання параметрів повітряного потоку при роздачі припливного повітря повітророзподільником з утворенням закрученої і настильної струмин в робочу зону приміщень. Вирішується питання за допомогою ефекту з утворенням закрученої і настильної струмин, які витікають з насадки за певних умов [5, 6, 8].

#### Мета та задачі досліджень

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.

Моделювали потік повітря за допомогою вирішувача CFD FLUENT (Ansys FLUENT). Під час моделювання у цій програмі було прийнято такі спрощення і припущення:

- внутрішнє повітря є нестискуваним, а потік повітря – усталеним;
- тепловіддача від внутрішніх поверхонь не враховувалась;
- нагрівали повітря у приміщенні в холодний період року радіаторами;
- припливне повітря подавалось повітророзподільником із утворенням закрученої і настильної 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 [5,6].

Для виведення рівняння руху необхідно, щоб виконувались закони збереження маси і енергії, а швидкість зміни трьох компонент імпульсу дорівнювала відповідним компонентам прикладених сил. Розглянуто  $k - \epsilon$  модель турбулентності.

Рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (1)$$

X, Y та Z – напрями (U, Y та W – імпульси) відповідно:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho uw) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial z}) + \\ + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial w}{\partial x}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho vw) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial z}) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial w}{\partial x}) - g(\rho - \rho_0) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u w) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v w) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w w) = & -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial w}{\partial z}) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial w}{\partial z}) \end{aligned} \quad (4)$$

Для замикання турбулентності, визначено зв'язок між напруженнями за Рейнольдсом і параметрами усередненого потоку за допомогою різних моделей турбулентності.

У пакеті AnsysFLUENT рівняння  $k - \epsilon$  моделі має вигляд:

$k$  та  $\epsilon$  – рівняння відповідно:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} S_\epsilon - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v\epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (6)$$

У цій системі рівнянь  $G_k$  – це турбулентна кінетична енергія, що утворюється від середніх градієнтів швидкості. Приймаючи гіпотезу Буссінеска, її можна виразити

$$G_k = \mu_t \cdot S^2, \quad (7)$$

де  $\mu_t = \rho \cdot C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ ,  $C_\mu = \text{const}$ ;  $S$  – інваріант тензора деформацій,

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad (8)$$

$G_b$  – кінетична енергія виштовхувальної сили:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (9)$$

де  $Pr_t$  – турбулентна стала Прандтля для енергії;  $g_i$  – компонента вектора гравітації в  $i$ -му напрямку;  $\beta$  – коефіцієнт температурного розширення,

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p, \quad (10)$$

де  $T$  – температура;  $C_{3\epsilon}$  – константа, яка визначає ступінь впливу виштовхувальної сили на  $\epsilon$ , визначається:

$$C_{3\epsilon} = \tanh \left| \frac{v'}{u'} \right|, \quad (11)$$

де  $v'$  – компонента швидкості повітря, паралельна до швидкості гравітації;  $u'$  – компонента швидкості повітря, перпендикулярна до швидкості гравітації;  $Y_M$  – внесок змінного розширення при турбулентності стиснення в загальну швидкість дисипації:

$$Y_M = 2\rho \epsilon M_t^2, \quad (12)$$

де  $M_t$  – число Маха для турбулентної рідини,

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}, \quad (13)$$

де  $a$  – швидкість звуку,  $a = \sqrt{gRT}$ .

Решта констант мають такі значення:  $C_{1e} = 1,44$ ,  $C_2 = 1,9$ ,  $s_k = 1,0$ ,  $s_e = 1,2$ .

Проведено розрахунок системи рівнянь Нав'є-Стокса, усередненої по Рейнольдсу за допомогою однопараметричної моделі турбулентності Спаларта-Алмараса, яка в пакеті AnsysFLUENT має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r\tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(r\tilde{v}u_j) = G_v + \frac{1}{s_{\tilde{v}}} \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (m + r\tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} r \left( \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v + S_{\tilde{v}}, \quad (14)$$

де  $G_v$  – турбулентна в'язкість;  $Y_v$  – руйнування турбулентної в'язкості;  $s_{\tilde{v}}$ ,  $C_{b2}$  – константи;  $v$  – молекулярна кінетична в'язкість.

Турбулентна в'язкість визначається:

$$m_i = r\tilde{v}f_{v1} \quad (15)$$

$$f_{v1} = \frac{c^3}{c^3 + C_{v1}^3}, \quad (16)$$

де  $c \equiv \frac{\tilde{v}}{\nu}$

$$G_v = C_{b1} r \cdot \tilde{S} \tilde{v}, \quad (17)$$

де  $\tilde{S} \equiv S + \frac{\tilde{v}}{k^2 d^2} f_{v2}$ ,  $f_{v2} = 1 - \frac{c}{1 + c \cdot f_{v1}}$ ,

а  $C_{b1}$ ,  $k$  – константи;  $S$  – інваріант тензора деформацій:

$$S \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}, \quad (18)$$

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

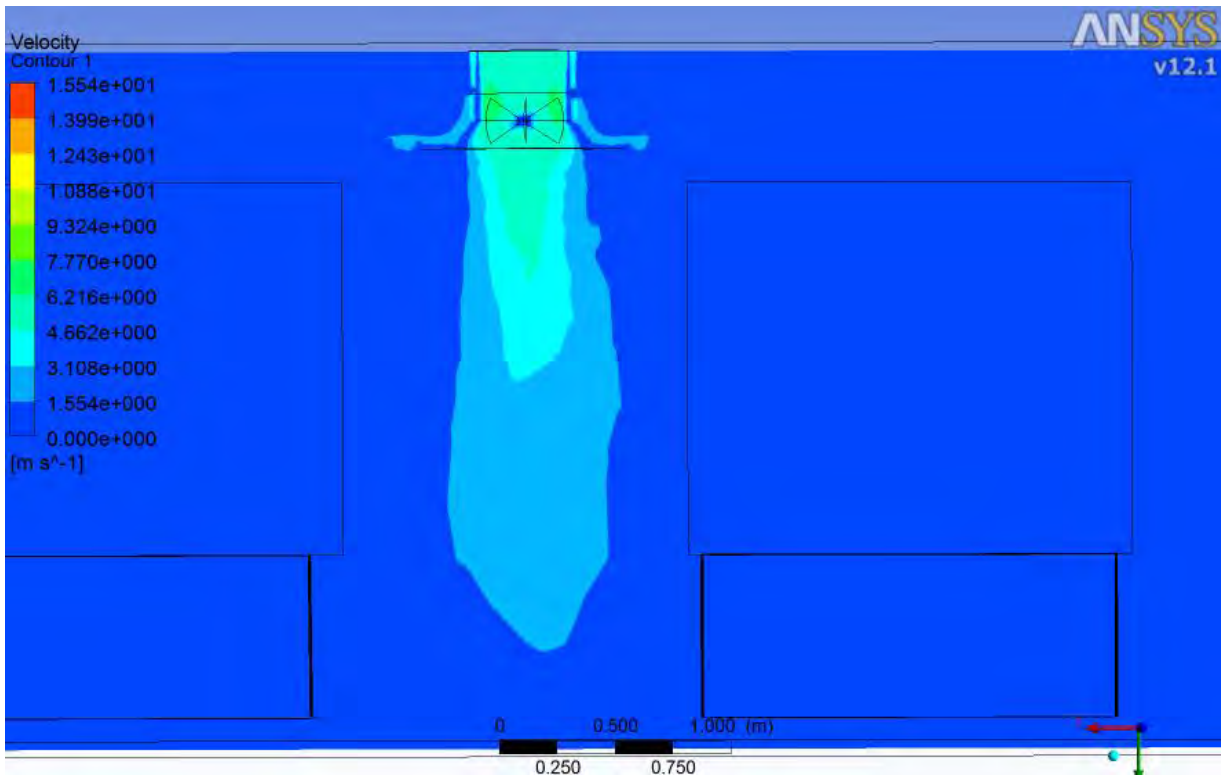
$$Y_v = C_{w1} r \cdot f_w \left( \frac{\tilde{v}}{d} \right)^2, \quad (19)$$

де  $f_w = g \left[ \frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]^{1/6}$ ,  $g = r + C_{w2}(r^6 - r)$ ,  $r \equiv \frac{\tilde{v}}{\tilde{S} k^2 d^2}$

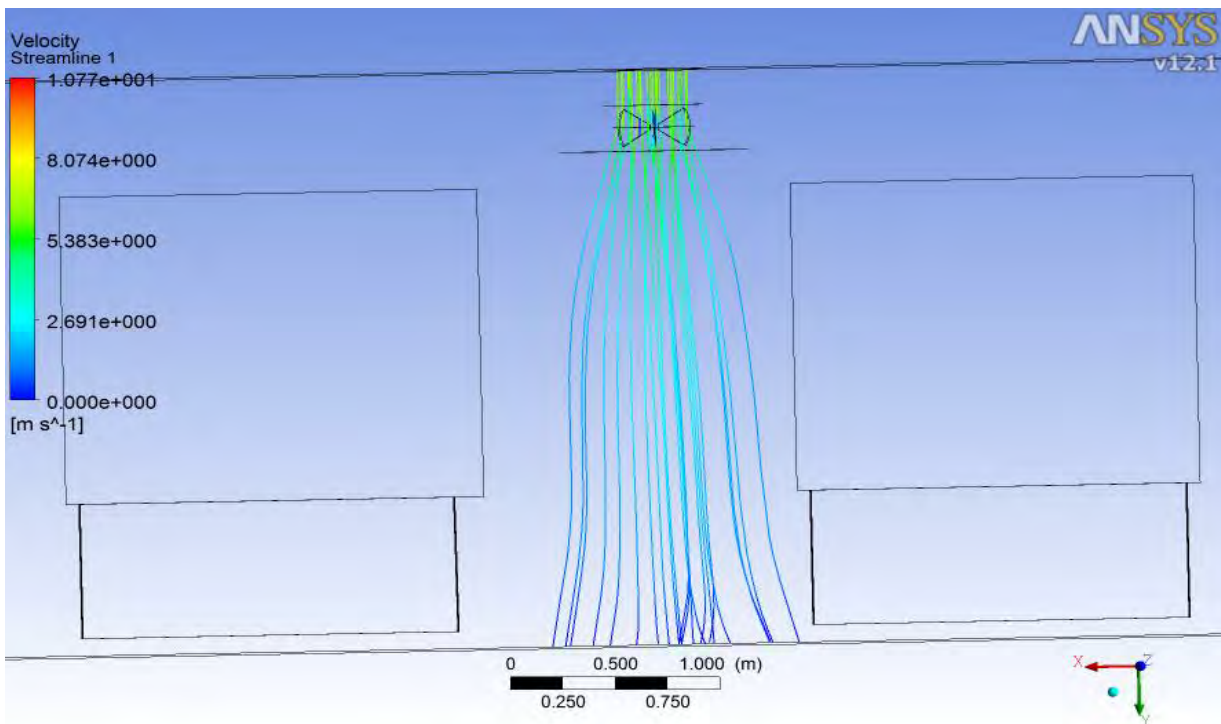
$C_{w1}$ ,  $C_{w2}$  і  $C_{w3}$  – константи:  $C_{b1} = 0,1335$ ,  $C_{b2} = 0,622$ ,  $s_{\tilde{v}} = \frac{2}{3}$ ,  $C_{v1} = 7,1$ ,

$C_{w1} = \frac{C_{b1}}{k^2} + \frac{(1 + C_{b2})}{s_{\tilde{v}}}$ ,  $C_{w2} = 0,3$ ,  $C_{w3} = 2,0$ ,  $k = 0,419$ .

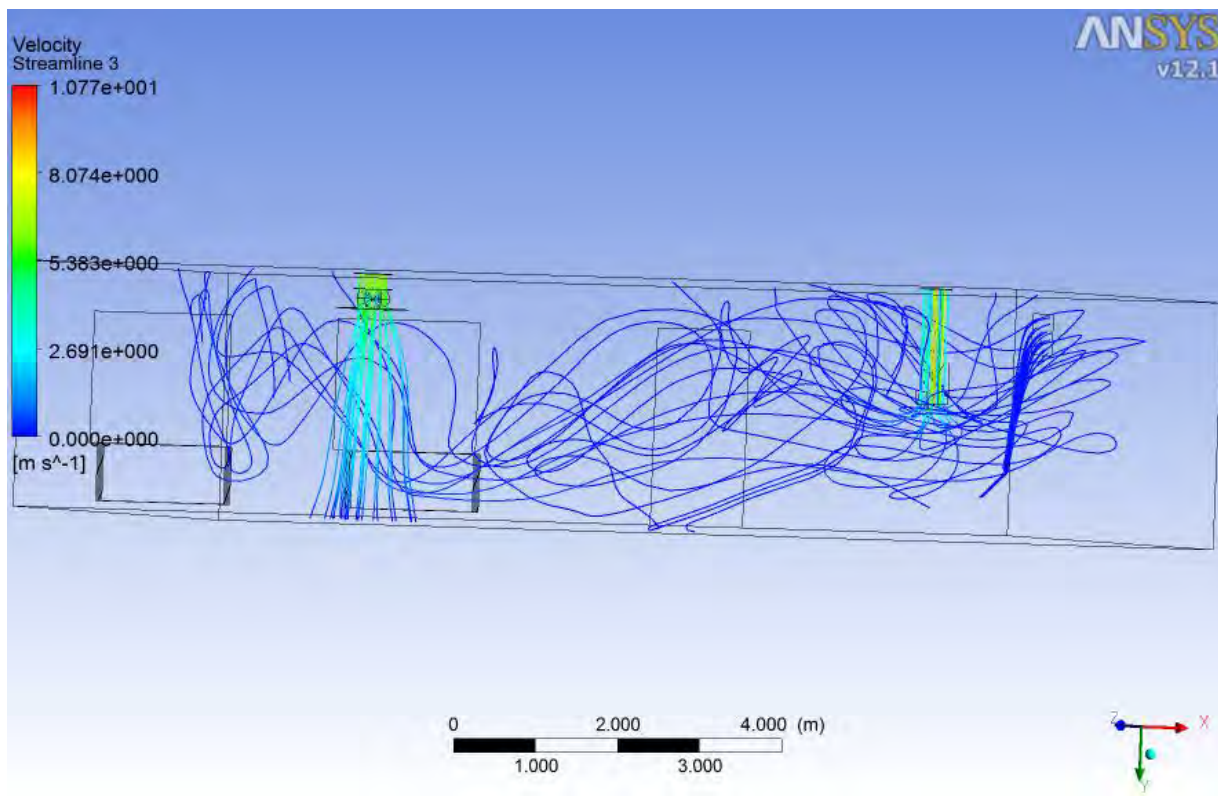
Як видно з рис. 1, припливна закручена струмина за кута нахилу закручувальних пластин  $90^\circ$  близька за своїми характеристиками до прямотокової. Настільна струмина розвивається незалежно від закрученої, тобто немає взаємодії струмин. При відносній відстані  $\bar{X} = 0,2$  від повітророзподільника  $\bar{v} = 0,75$ , а при  $\bar{X} = 0,4$  –  $\bar{v} = 0,5$ . Як видно з рис. 4, за кута нахилу закручувальних пластин  $60^\circ$  припливна настільна струмина теж розвивається незалежно від закрученої, тобто немає взаємодії струмин. За відносної відстані  $\bar{X} = 0,11$  величина  $\bar{v} = 0,7$ , при  $\bar{X} = 0,2$  –  $\bar{v} = 0,5$ , а при  $\bar{X} = 0,4$  –  $\bar{v} = 0,3$ . За кута нахилу закручувальних пластин  $30^\circ$  (рис. 7) відбувається взаємодія закрученої і настільної струмин. Інтенсивне спадання швидкості у припливному повітряному потоці відбувається у перерізі  $\bar{X} = 0,2$ .



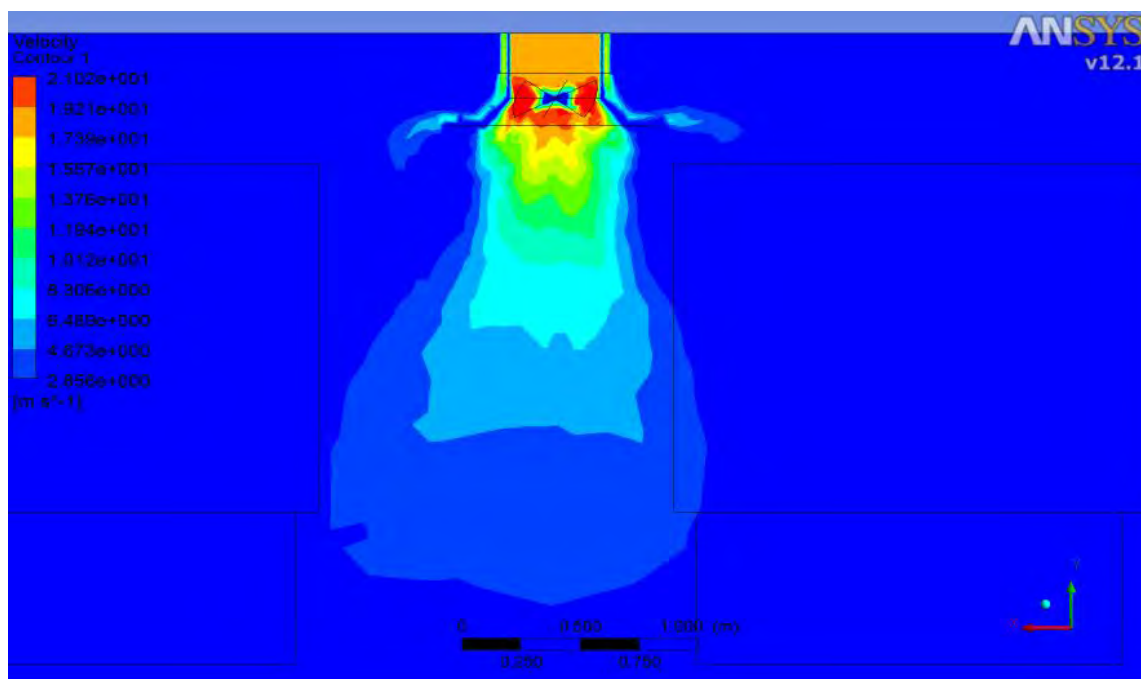
*Рис. 1. Розподіл швидкостей приливного повітряного потоку у перерізі повітророзподільника під час подавання повітря закрученою і настільною струминами і кута нахилу закручувальних пластин  $90^\circ$*



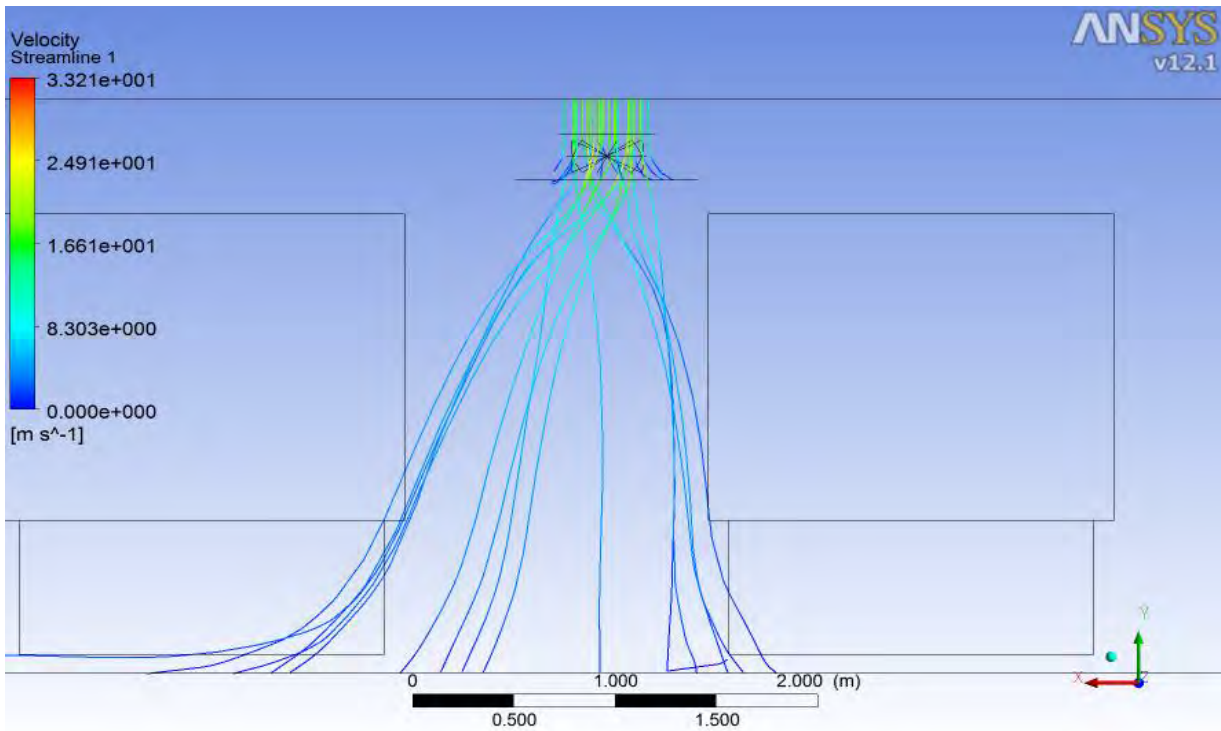
*Рис. 2. Лінії течії під час подавання повітря закрученою і настільною струминами і кута нахилу закручувальних пластин  $90^\circ$*



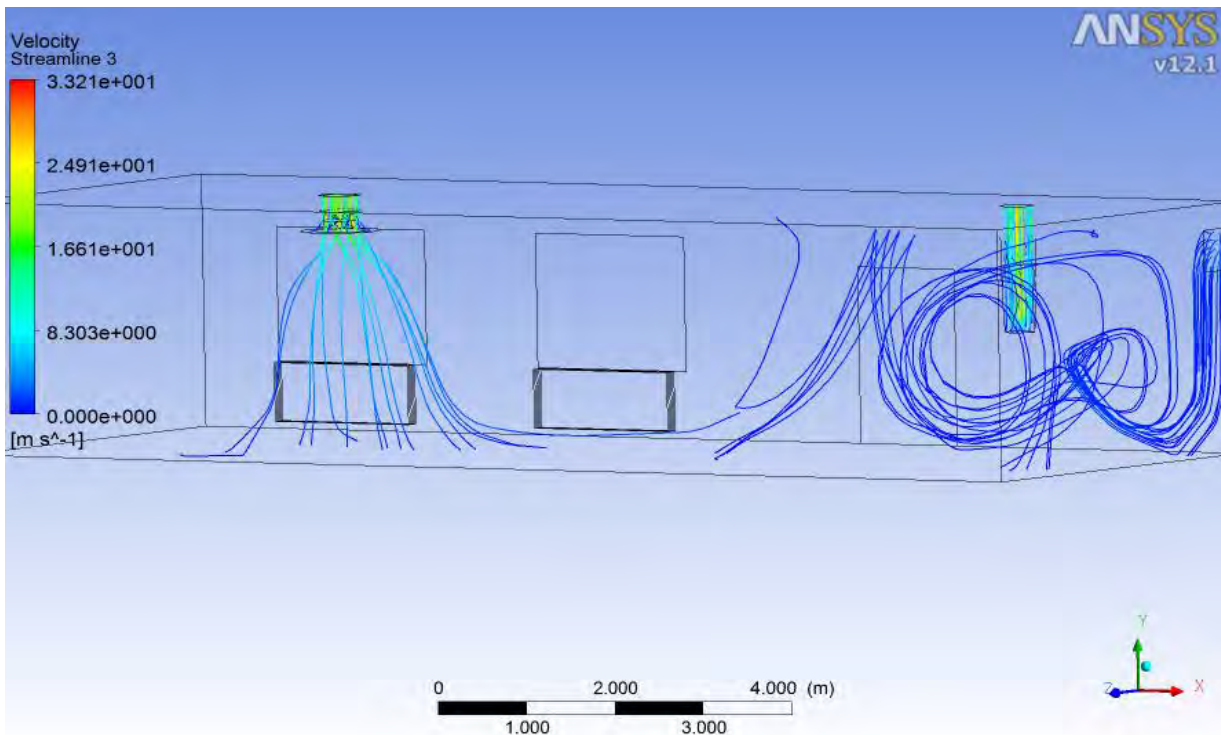
*Рис. 3. Розподіл повітряних потоків у приміщенні під час подавання повітря повітророзподільником із кутом нахилу закручувальних пластин 90°*



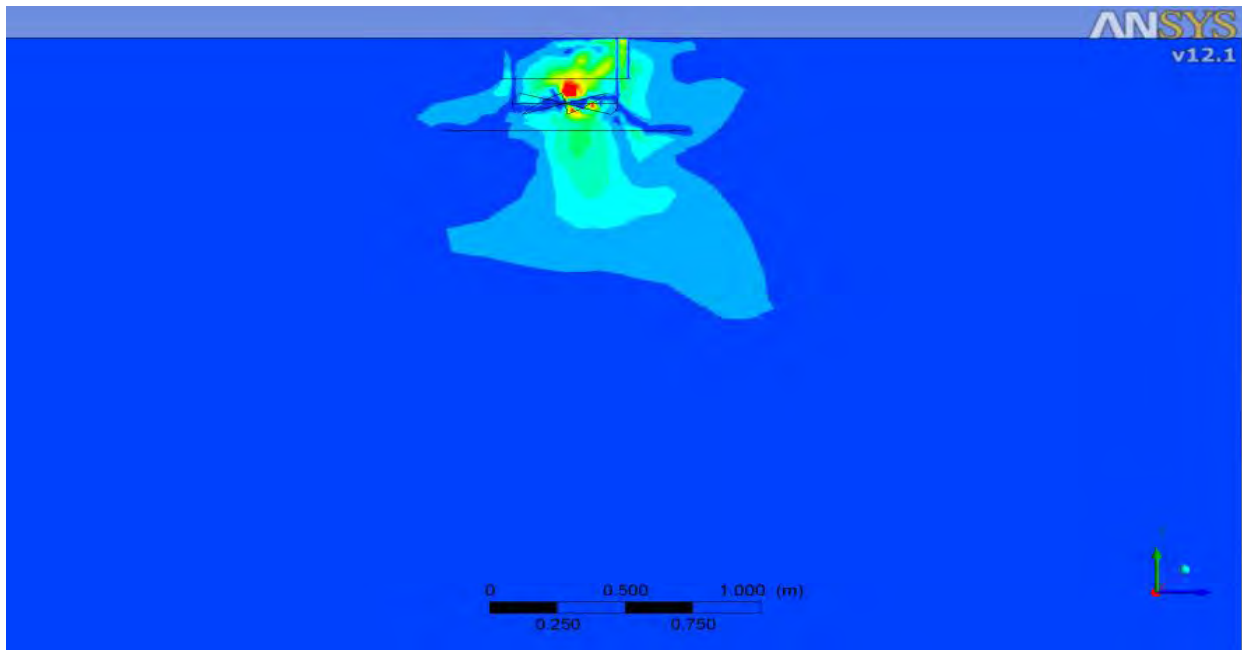
*Рис. 4. Розподіл швидкостей припливного повітряного потоку у перерізі повітророзподільника під час подавання повітря закрученою і настільною струминами і кути нахилу закручувальних пластин 60°*



*Рис. 5. Лінії течії під час подавання повітря закрученою і настільною струминами і кута нахилу закручувальних пластин 60°*



*Рис. 6. Розподіл повітряних потоків у приміщенні під час подавання повітря повітророзподільником із кутом нахилу закручувальних пластин 60°*



*Рис. 7. Розподіл швидкостей припливного повітряного потоку у перерізі повітророзподільника під час подавання повітря закрученою і настільною струминами і кута нахилу закручувальних пластин 30*

На основі отриманих результатів констатуємо:

- спостерігається істотне збільшення швидкостей на закручувальних пластинах, що свідчить про турбулізацію повітряного потоку у разі потрапляння на них.
- визначено та оптимізовано геометричні та витратні характеристики повітророзподільника з утворенням закрученої і настільної струмин;
- визначено, що для досягнення підвищення інтенсивності загасання швидкості руху потоку повітря  $\bar{V}$  необхідно збільшити кут нахилу закручувальних пластин і застосувати ефект настилання;
- застосування повітророзподільників з утворенням закрученої і настільної струмин дасть змогу значно підвищити критерій ADPI [2] під час подавання у виробничі приміщення значної кількості повітря, необхідної для забезпечення санітарно-гігієнічних параметрів мікроклімату приміщень та технологічності виробничих процесів, що відбуваються в цих приміщеннях.

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. Возняк О.Т. *Вплив взаємодії струмин на повітророзподіл у приміщенні*// Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – Львів. 2001ю – С. 27–31. 4. Банхиди Л. *Тепловой микроклимат помещений*. – М. : Стройиздат, 1981. – 248 с. 5. Возняк О. Т., Сухолова І. Є., Миронюк Х. В. *Повітророзподіл закрученими струминами у приміщеннях малого об’єму*. Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Теорія і практика будівництва”. – 2011. – № 697. – С. 60–62. 6. Возняк О. Т., Сухолова І. Є., Миронюк Х. В. *Підвищення ефективності повітророзподілу у приміщенні при використанні закручених струмин*. MOTROL. *Motoryzacja i energetyka rolnictwa. Motorization and power industry in agriculture*. Т. 12. – Lublin 2010. – Р. 210–214. 7. Возняк О. Т., Сухолова І. Є. *Методи зниження енерговитрат*. Вісник “Ринок інсталяцій”. – № 9 (157). –2010. – С.16. 8. Karalo P. *Analysis of ventilation rate and concentrations of carbon dioxide in the office* // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – Львів. 2013, – С. 85–93. 9. Karelóvá Z., Vranayová Z., Káposztásóvá D., Purcz P. *Risk analysis for RWH system and its verification by mathematical methods*// Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – Львів., 2013. – С. 93– 98. 10. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. – М.: Наука, 1976. – 279 с.