

УДК 697.92

професор **Віктор Мілейковський**,
mileikovskiy.vo@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8543-1800
асистент **Володимир Вахула**,
v.vahula@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7973-6421
асистент **Олексій Дудніков**,
dudnikov.oa@knuba.edu.ua, ORCID: 0009-0000-2656-2683
Київський національний університет будівництва і архітектури

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ПОВІТРООБМІНУ З БАГАТОСТРУМИННИМИ ПОВІТРОРозПОДІЛЬНИКАМИ

***Анотація.** Для забезпечення оптимальних умов у музейних приміщеннях одним із важливих аспектів є система кондиціонування повітря. Традиційні системи вентиляції та кондиціонування повітря з постійною витратою повітря можуть бути не ефективні. У контексті оптимізації мікроклімату в приміщеннях музеїв, принциповою є реалізація технологічних норм та вимог, спрямованих на стабілізацію температурно-вологісного режиму. Важливо зазначити, що умови збереження музейних експонатів передбачають незмінність температурного (16-24 °С, оптимально 18-22 °С) та вологісного (55 % ± 5 %) режимів. Багатоструминні повітророзподільники в системах із змінною витратою – це один із сучасних підходів, який може забезпечити оптимальні параметри для музейних приміщень. У роботі розглянуто теоретичні дослідження багатоструминого повітророзподільника, який може створювати вісесиметричну та віялову струмини, а також комбінувати ці струмини разом. Уточнено формулу для коефіцієнта неізотермічності струмин, що подаються вертикально проти впливу гравітаційних сил, відповідно до експериментальних даних. Моделювалися три схеми подавання повітря вертикально вниз: вісесиметричною струминою, віяловою струминою та обома струминами. Для приміщення виставкової зали виконано моделювання розподілу температури, швидкості та відносної вологості повітря на висоті 1,5 м (місце розміщення картин). У результаті виявлено, що подавання компактною охолодженою струминою ефективно лише при витраті повітря 25 %. Подавання віяловою охолодженою струминою забезпечує нормативні параметри повітря. Нагріта віялова струмина спливає і не досягає робочої зони. Подавання нагрітою вісесиметричною струминою вимагає регулювання площі випуску повітря.*

Ключові слова: багатоструминний повітророзподільник, музей, мікроклімат, вентиляція, кондиціонування повітря, змінна витрата повітря, ступінь регулювання, математична модель.

Вступ. Науковці та фахівці в галузі зберігання та консервації об'єктів культурної спадщини досліджують та впроваджують різні технології для забезпечення оптимальних умов у музейних приміщеннях. Одним з найважливіших аспектів є системи вентиляції та кондиціонування повітря. Вони відіграють критичну роль у підтриманні стабільної температури та вологості повітря, а також у забезпеченні високої якості повітря для збереження та захисту експонатів. Однак, традиційні системи вентиляції та кондиціонування повітря з постійною витратою можуть бути неефективними та недоцільними у виставкових залах музеїв. Використання багатострумінних повітророзподільних пристроїв у системах зі змінною витратою є новим підходом, який може забезпечити оптимальне співвідношення між зменшенням енергоспоживання та забезпеченням комфортних умов для відвідувачів та експонатів. Такі системи можуть адаптуватися до змін зовнішніх факторів, це дозволяє знижувати витрати енергії, зберігаючи при цьому високу якість повітря і стабільні параметри в середині виставкових залів.

Останні дослідження та публікації. У контексті оптимізації мікроклімату в приміщеннях музеїв, принциповою є реалізація технологічних норм та вимог, спрямованих на стабілізацію температурно-вологісного режиму. Важливо зазначити, що умови збереження музейних експонатів передбачають незмінність температурного (16-24 °C, оптимально 18-22 °C) та вологісного ($55 \pm 5\%$) режимів. Надважливим є наявність автоматизованих систем моніторингу та регулювання мікроклімату, забезпечуючи таким чином цілодобовий та цілорічний контроль параметрів повітря, що є критичним для оптимального зберігання творів мистецтва [1].

Розподіл простору музею визначається функціональними потребами [2], зокрема:

- допоміжні приміщення, які не використовуються для зберігання колекцій, обладнуються стандартними системами вентиляції та кондиціонування повітря, які застосовуються у загальнобудівельній практиці.
- виставкові та експозиційні зали, які містять колекції і доступні для відвідувачів, вимагають індивідуалізованого підходу до вентиляції, щоб забезпечити стабільність мікроклімату.
- фондосховища з обмеженим доступом також потребують окремих систем вентиляції, не інтегрованих з іншими частинами музею, щоб забезпечити оптимальне зберігання експонатів.

Для уникнення складних експериментів при дослідженні поітророзподілення було показано ефективність математичного моделювання методами обчислювальної гідромеханіки [3]. Проте аналітичні методи дозволяють швидше проводити аналіз поведінки струмінних течій.

Затухання неплоских струминних течій описується [4] формулами для максимальної швидкості й надлишкової температури:

$$V_{x,m} = V_o \cdot m \cdot \frac{\sqrt{F_o}}{X} \cdot K_{\text{вз}} \cdot K_n, \text{ м/с}, \quad (1)$$

$$\Delta T_{x,m} = \Delta T_o \cdot n \cdot \frac{\sqrt{F_o}}{X} \cdot K_{\text{вз}} \cdot K_n^t = \Delta T_o \cdot n \cdot \frac{\sqrt{F_o}}{X} \cdot \frac{K_{\text{вз}}}{K_n}, \text{ К}. \quad (2)$$

де V_o – початкова швидкість, м/с; m – коефіцієнт затухання швидкості, що для деяких струмин може залежати від X ; F_o – площа випуску струмини, м², X – довжина шляху струмини, м; ΔT_o – надлишкова температура, К, n – коефіцієнт затухання температури, що для деяких струмин може залежати від X ; $K_{\text{вз}}$ – коефіцієнт взаємодії паралельно випущених струмин; K_n – коефіцієнт неізотермічності за формулою

$$K_n = (1 \pm 2,5 \cdot Ar_x)^{1/3}; \quad (3)$$

Ar_x – плинний критерій Архімеда

$$Ar_x = Ar_o \cdot \frac{n}{m^2} \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{F_o}} \right)^2; \quad (4)$$

Ar_o – початковий критерій Архімеда

$$Ar_o = \frac{g \cdot \Delta T_o \cdot \sqrt{F_o}}{V_o^2 T_{\text{нав}}}; \quad (5)$$

K_n^t – коефіцієнт неізотермічності за надлишковою температуою, який у [5] прийнято $1/K_n$.

Формули (1-5) дозволяють аналітично визначити особливості розвитку струмин, що застосовуються у вентиляції та кондиціонуванні повітря.

Метою роботи є дослідження розвитку припливних струмин для різних способів подачі повітря до робочої зони виставкових зал музеїв для систем кондиціонування повітря зі змінною витратою.

Визначення умови руйнування струмини. При вентиляванні приміщень спеціального призначення виникають випадки подавання струмин з високими

числами Архімеда. Тому перевіримо умови розвитку струмин проти гравітаційних сил за таких умов.

Спочатку підставимо формули (3, 4) до (1, 2):

$$V_{x,m} = V_o \cdot F_o^{1/2} \cdot K_{\text{гз}} \cdot m \cdot \left(\frac{1}{X^3} \pm \frac{2,5 \cdot \frac{Ar_o \cdot n}{F_o \cdot m^2}}{X} \right)^{1/3}, \text{ м/с.} \quad (6)$$

$$\Delta T_x = \Delta T_o \cdot F_o^{1/2} \cdot K_{\text{гз}} \cdot n \cdot \frac{1}{\left(X^3 \pm 2,5 \cdot \frac{Ar_o \cdot n}{F_o \cdot m^2} \cdot X^5 \right)^{1/3}}, \text{ К.} \quad (7)$$

Для зручності аналізу позначимо вирази, що є константами, за умови постійних значень m і n :

$$A_m = V_o \cdot \sqrt{F_o} \cdot K_{\text{гз}} \cdot m > 0, \quad (8)$$

$$A_n = \Delta T_o \cdot \sqrt{F_o} \cdot K_{\text{гз}} \cdot n > 0, \quad (9)$$

$$B = 2,5 \cdot \frac{Ar_o \cdot n}{F_o \cdot m^2} > 0. \quad (10)$$

Формули (7) і (8) та їхні похідні вздовж X при $m = \text{const}$ і $n = \text{const}$ з урахуванням позначень (8-10) набудуть вигляду:

$$V_x = \frac{A_m \cdot (1 \pm B \cdot X^2)^{1/3}}{X} = A_m \cdot \left(\frac{1}{X^3} \pm \frac{B}{X} \right)^{1/3}, \text{ м/с,} \quad (11)$$

$$\Delta T_x = A_n \cdot \frac{1}{X \cdot (1 \pm B \cdot X^2)^{1/3}} = A_n \cdot \frac{1}{(X^3 \pm B \cdot X^5)^{1/3}}, \text{ К,} \quad (12)$$

$$\frac{dK_n}{dX} = \pm \frac{2}{3} \cdot \frac{B \cdot X}{(2,5 \pm B \cdot X^2)^{2/3}}, \text{ м}^{-1} \quad (13)$$

$$\frac{dV_x}{dX} = -\frac{A_m}{3} \cdot \frac{3 \pm B \cdot X^2}{X^2 \cdot (1 \pm B \cdot X^2)^{2/3}}, \text{ с}^{-1}, \quad (14)$$

$$\frac{d\Delta T_x}{dX} = -\frac{A_n}{3} \cdot \frac{3 \pm 5 \cdot B \cdot X^2}{X^2 \cdot (1 \pm B \cdot X^2)^{4/3}}, \text{ К/м} \quad (15)$$

Вирази (11-15) дають монотонне спадання максимальної швидкості та надлишкової температури при знаку «плюс», тобто коли сили гравітації та інерції діють в одному напрямку. Знак «мінус» при протидії цих сил призводить до можливості зростання цих величин. Це неможливо і свідчитиме лише про руйнування струмини силами гравітації. Також вирази в дужках формул (11) і (12) можуть стати від'ємними, що означає зворотний напрямок руху струмини – руйнування.

Визначаємо відповідні додатні значення X , м (табл. 1). Серед усіх значень найменше відповідає нульовій похідній надлишкової температури. (виділено в табл. 1). Підставляємо до виразу для цього значення з табл. 1 формулу (10) і маємо значення абсциси, за якого це відбувається (коефіцієнт заокруглювати в більший бік не можна через можливі помилки комп'ютерного розрахунку):

$$X_p = m \cdot \sqrt{\frac{0,24 \cdot F_o}{Ar_o \cdot n}} \approx 0,489 \cdot m \cdot \sqrt{\frac{F_o}{Ar_o \cdot n}}, \text{ м.} \quad (16)$$

Підставляємо формулу (16) до (4) і маємо мінімальне значення критерію Архімеда $Ar_x = 0,24$. Але струмина за дослідними даними має руйнуватися при $Ar_x = 0,4$. Аналогічні розрахунки для значень, що змінюють знак швидкості та обертають похідні на нескінченні (в табл. 1 виділено жирними рамками), дають

$$X_{pyin} = \frac{m \cdot \sqrt{0,4 \cdot F_o}}{Ar_o \cdot n} \approx 0,632 \cdot m \cdot \sqrt{\frac{F_o}{Ar_o \cdot n}}, \text{ м.} \quad (17)$$

Підставляємо формулу (16) до (4) і маємо правильне максимальне значення критерію Архімеда $Ar_x = 0,4$.

Таблиця 1. Значення $X > 0$, за яких порушуються умови розвитку струмини при знаку «мінус» у формулах (3), (6) і (7)

Величина	Значення X , м, що забезпечує			
	значення величини		значення похідної	
	нуль	нескінченність	нуль	нескінченність
V_x , м/с	$X = \frac{1}{\sqrt{B}}$	–	$\sqrt{\frac{3}{B}}$	$X = \frac{1}{\sqrt{B}}$
ΔT_x , К	–	$X = \frac{1}{\sqrt{B}}$	$\sqrt{\frac{3/5}{B}}$	$X = \frac{1}{\sqrt{B}}$

Примітка. Сірим виділено найменше значення; жирними рамками позначено значення, яку відповідає руйнуванню струмини

Таким чином, формула (3) не дає можливості передбачити максимальну температуру в струмині при $Ar_x > 0,24$, якщо струмина рухається проти дії гравітаційних сил.

Ця проблема є відомою, хоча довідники з вентиляції подібної інформації не містять. У монографії [5] наведено експериментальні дані щодо коефіцієнтів неізотермічності (рис. 1). При значенні критерію Архімеда $Ar_x = 0,2$ відбувається відхилення від значення $K_n^t = 1/K_n$ за формулою (3). А біля значення $Ar_x = 0,24$ маємо максимум, після якого коефіцієнт неізотермічності спадає.

Дослідні дані на рис. 1 б добре описуються залежністю, яку рекомендовано для випадку руху струмини проти впливу гравітаційних сил:

$$K_n^t = (16 \cdot Ar_x^2 + 1) \cdot (1 - 6,25 \cdot Ar_x^2) \quad (18)$$

Підставляємо формули (4, 9, 10, 18) до (2):

$$\Delta T_{x,m} = A_n \cdot \frac{(256 \cdot B^2 \cdot X^4 + 100) \cdot (1 - B^2 \cdot X^4)}{100 \cdot X}, \text{ К.} \quad (19)$$

Похідна формули (19)

$$\frac{d \Delta T_{x,m}}{dX} = -A_n \cdot \frac{(448 \cdot B^4 \cdot X^8 - 117 \cdot B^2 \cdot X^4 + 25)}{25 \cdot X^2}, \text{ К/м.} \quad (20)$$

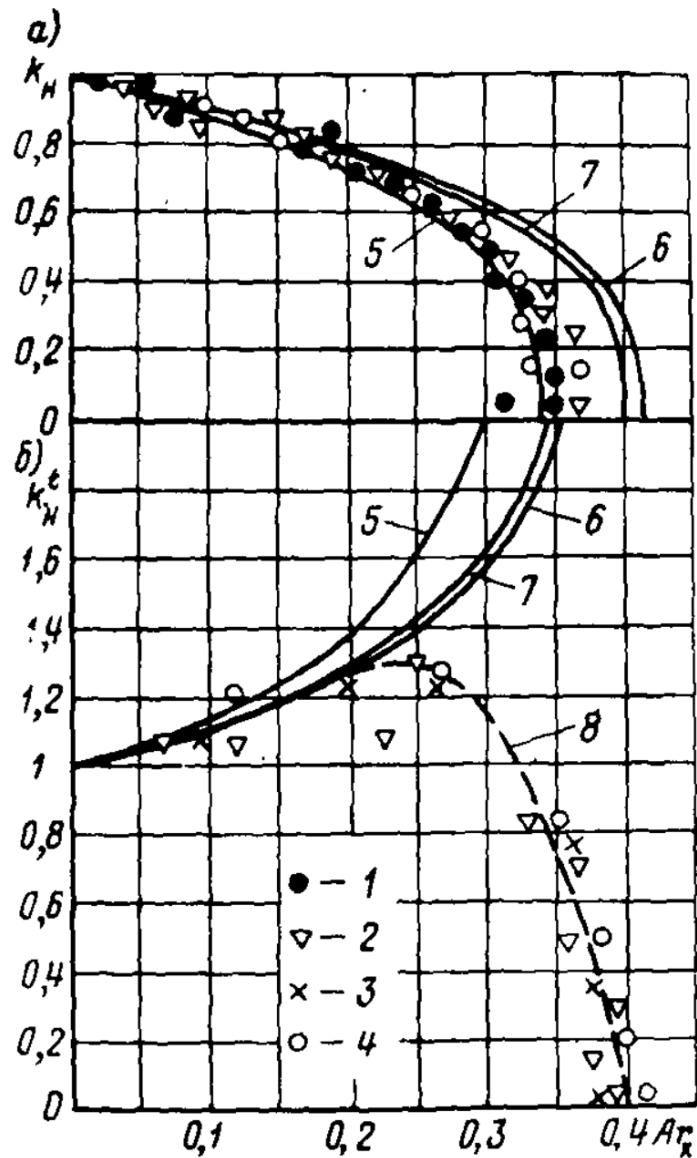


Рис. 1. Коефіцієнти неізотермічності при русі струмини проти впливу гравітаційних сил [5]:

а – для швидкості; б – для надлишкової температури:

1 – дослідні дані Хеландера; 2 – дослідні дані Кнаака; 3 – дослідні дані І. Шепелева та А. Посохіна; 4 – дослідні дані М. Гримітліна; 5 – формула І. Шепелева; 6 – формула В. Талієва; 7 – $K_n^t = 1/K_n$ за формулою (3); 8 – за результатами дослідів

Вираз у дужках формули (20) є квадратним рівнянням відносно $B^2 X^4$ з від'ємним дискримінантом. Отже, похідна (20) коренів не має. При $X = 1/B^{1/2}$ похідна (20) від'ємна. Отже, температура завжди спадає, що характерно для струмин. Таким чином, формулу (18) рекомендовано до застосування для гарячих струмин, спрямованих униз, і холодних струмин, спрямованих угору.

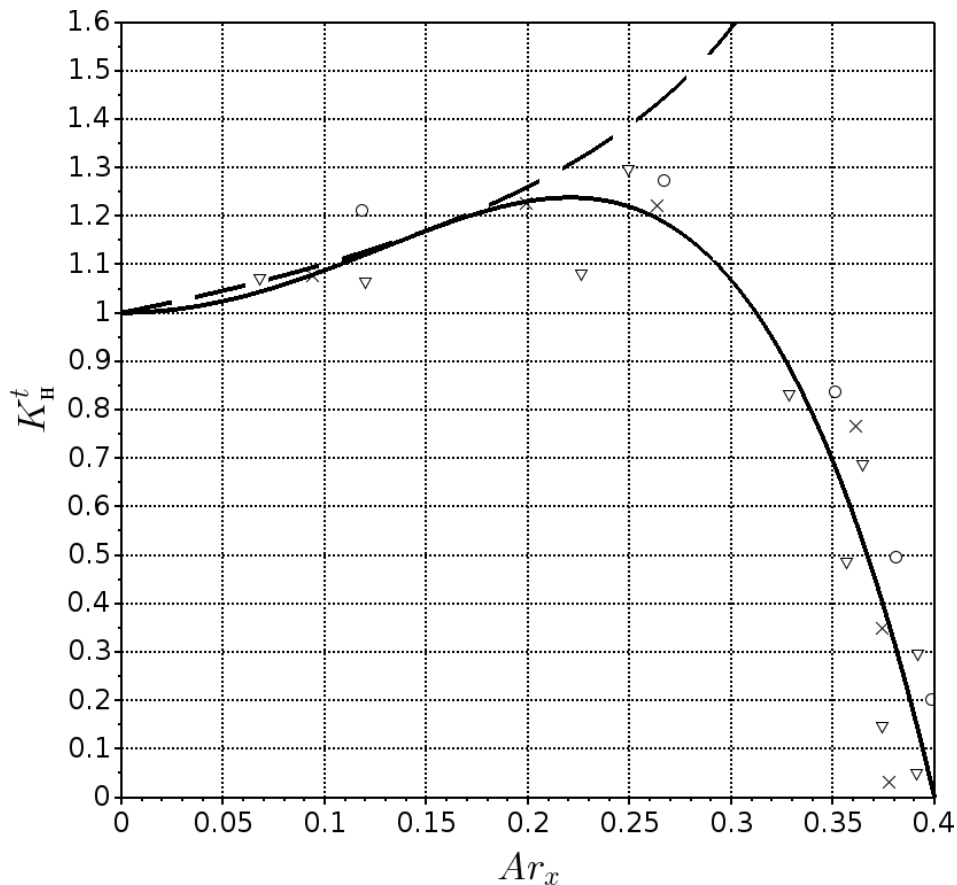


Рис. 2. Апроксимація коефіцієнта неізотермічності при русі струмини проти впливу гравітаційних сил для надлишкової температури [5]:

∇ – дослідні дані Кнаака; \times – дослідні дані І. Шепелева та А. Посохіна; \circ – дослідні дані М. Гримітліна; — — — $K_n^t = 1/K_n$ за формулою (3); суцільна лінія – формула (16)

За формулами (1-5) і (18) створено програму розрахунку струмин для SciLab, що дозволяє моделювати струмини в широкому діапазоні чисел Архімеда.

Застосування експериментального повітророзподільника для вентиляції музейної зали. У роботі запропоновано використання експериментального повітророзподільного пристрою, який утворює віялові, закручені та вісесиметричні струмини [6]. Моделювання і розрахунок виконано для приміщення виставкової зали Національного центру народної культури "Музей Івана Гончара" для трьох схем подачі повітря:

- схема А – подавання повітря згори донизу вісесиметричними струминами (рис. 3);
- схема Б – подача повітря віяловими струминами, що настилаються на стелю (рис. 4);
- схема В – подача повітря згори донизу обома типами струмини.

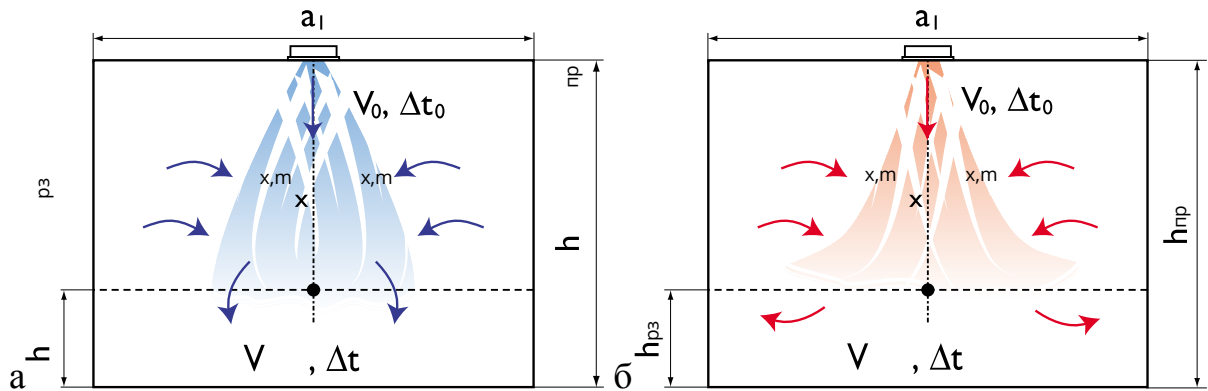


Рис. 3. Схема А подавання повітря конічною струминою:
а – охолодженою; б – нагрітою

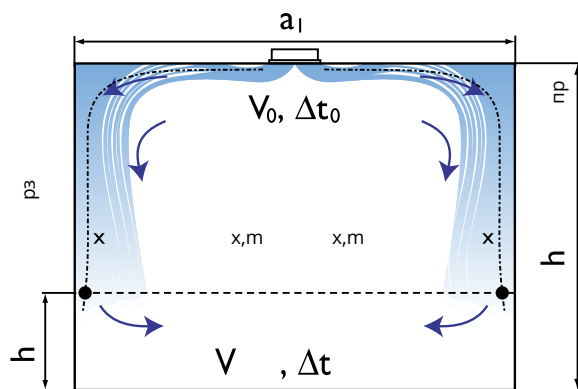


Рис 4. Схема Б подавання повітря віяловою струминою, що настилається

Приміщення має висоту $h_{пр} = 3,7$ м і ширину $a_I = 4,6$ м. Прийнята кількість повітророзподільників – 2 шт. Витрата повітря $L = 890$ м³/год. Витрата одного повітророзподільника $L_0 = 445$ м³/год. Нормована швидкість повітря в робочій зоні $v_{норм} = 0,3$ м/с. Нормована максимальна швидкість у струмині при коефіцієнті переходу від нормованої швидкості руху повітря до максимальної у струмені $K_n = 1,2$ маємо $V_{норм} = 0,36$ м/с. Нормована надлишкова температура припливного повітря – $\Delta T_{норм} = \pm 1,0$ К. Робоча різниця температур $\Delta T_{рм} = - 5$ К. Висота робочої зони 2,0 м. Температура припливного повітря в теплий період року $t_n = 16$ °С ($T_n = 289,15$ К). Температура в приміщенні $t_{нав} = 21$ °С ($T_{нав} = 294,15$ К).

Для кожної схеми визначаються параметри m та n експериментального повітророзподільника. Для кожного окремого способу подавання повітря приймаємо дані для повітророзподільника, що утворює таку ж струмину.

Для конічних струмин приймаємо дані дифузора круглого типу ДПУ-К Ø250:

- коефіцієнт затухання швидкості $m = 2,0$;
- коефіцієнт затухання надлишкової температури $n = 1,7$;
- площа випуску повітря $F_0 = 0.015$ м²;

Максимальна початкова швидкість при продуктивності 100 % становить 8,24 м/с.

Для віялових струмин приймаємо дані того ж дифузора круглого типу ДПУ-К Ø250:

- коефіцієнт затухання швидкості $m = 2,1$;
- коефіцієнт затухання надлишкової температури $n = 1,8$;
- площа випуску повітря $F_0 = 0.064 \text{ м}^2$;

Максимальна початкова швидкість при продуктивності 100 % становить 1,93 м/с.

Коефіцієнт взаємодії $K_{\text{вз}}$ прийнято 0,9.

Розрахункову довжину струмини для схеми А визначаємо як відстань від стелі до входу до робочої зони заввишки $h_{\text{pz}} = 2 \text{ м}$ за формулою

$$X = h_{\text{np}} - h_{\text{pz}} = 1,7 \text{ м.} \quad (1)$$

Розрахункову довжину струмини для схеми Б визначаємо як відстань від стелі до входу до робочої зони заввишки $h_{\text{pz}} = 2 \text{ м}$ плюс відстань від повітророзподільника до стіни $a_1/2$ (або половину відстані до сусіднього повітророзподільника, якщо він не один):

$$X = (h_{\text{np}} - h_{\text{pz}}) + (a_1/2) = 4,0 \text{ м.} \quad (2)$$

Визначаємо максимальну швидкість $V_{x,m}$, м/с, і надлишкову температуру на цій відстані та порівнюємо з нормативним значенням (рис. 5). Бачимо, що схема А застосовна лише для витрати повітря 25 % від розрахункової через перевищення нормативної швидкості. Натомість, схема Б при цій витраті (рис. 6) забезпечує швидкість повітря на вході струминних течій до робочої зони біля 0,2 м/с.

Подавання нагрітих струмин з робочим перепадом температури 5 К за схемою Б дає перевищення числа Архімеда за будь-якого режиму витрати. Отже, струмина спливає з порушенням циркуляції повітря. Схема А має дуже вузький діапазон регулювання (рис. 7) – від 25 до 37,5 %. Збільшення витрати повітря вимагатиме регулювання (збільшення) площі випуску повітря з повітророзподільників.

Моделювання методами обчислювальної гідродинаміки. На основі проведених розрахунків було виявлено, що зміна кількості повітря при подаванні охолоджених струмин мало впливає на температуру повітря на вході до робочої зони ($\Delta T < 1 \text{ К}$). Для підтвердження цього виконано математичне моделювання руху повітря в приміщенні на підставі стандартної к-ε моделі.

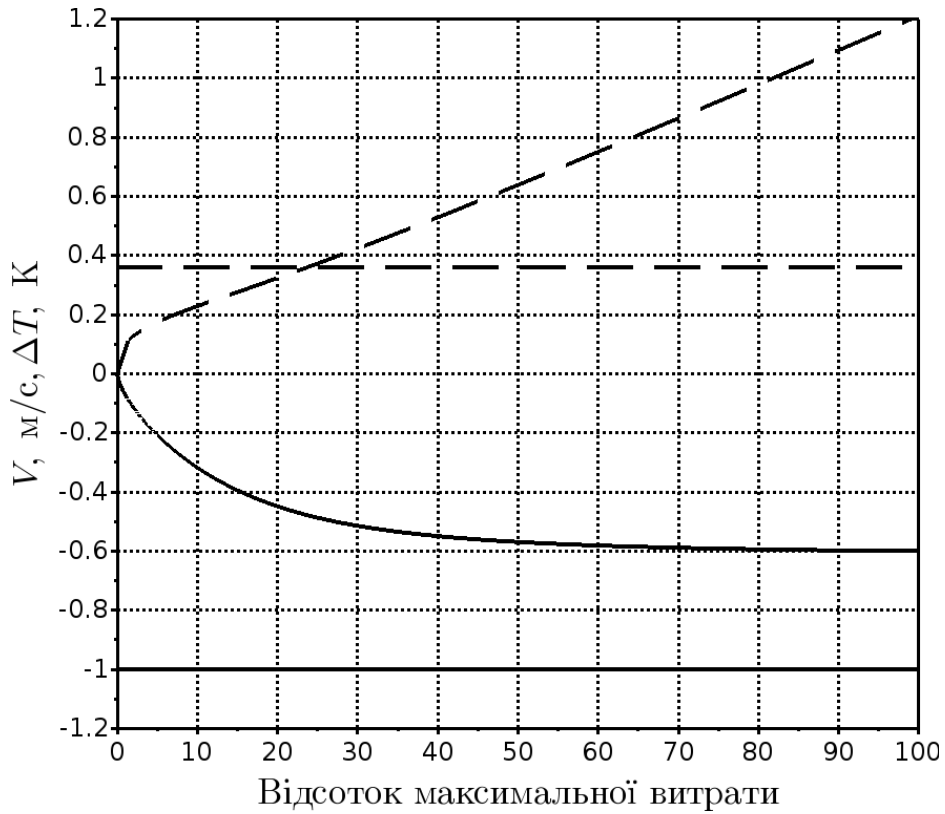


Рис 5. Параметри струмини на вході до робочої зони за схемою А:
 — — — швидкість V , м/с, — — — надлишкова температура ΔT , К, м/с

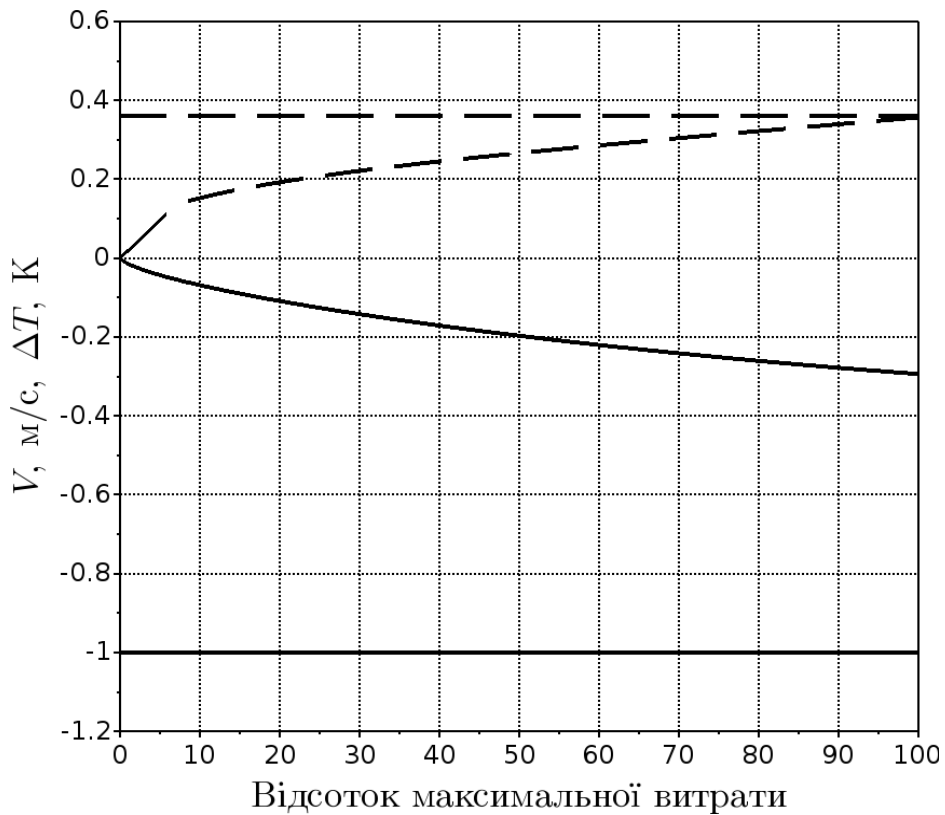


Рис 6. Параметри струмини на вході до робочої зони за схемою Б:
 — — — швидкість V , м/с, — — — надлишкова температура ΔT , К, м/с

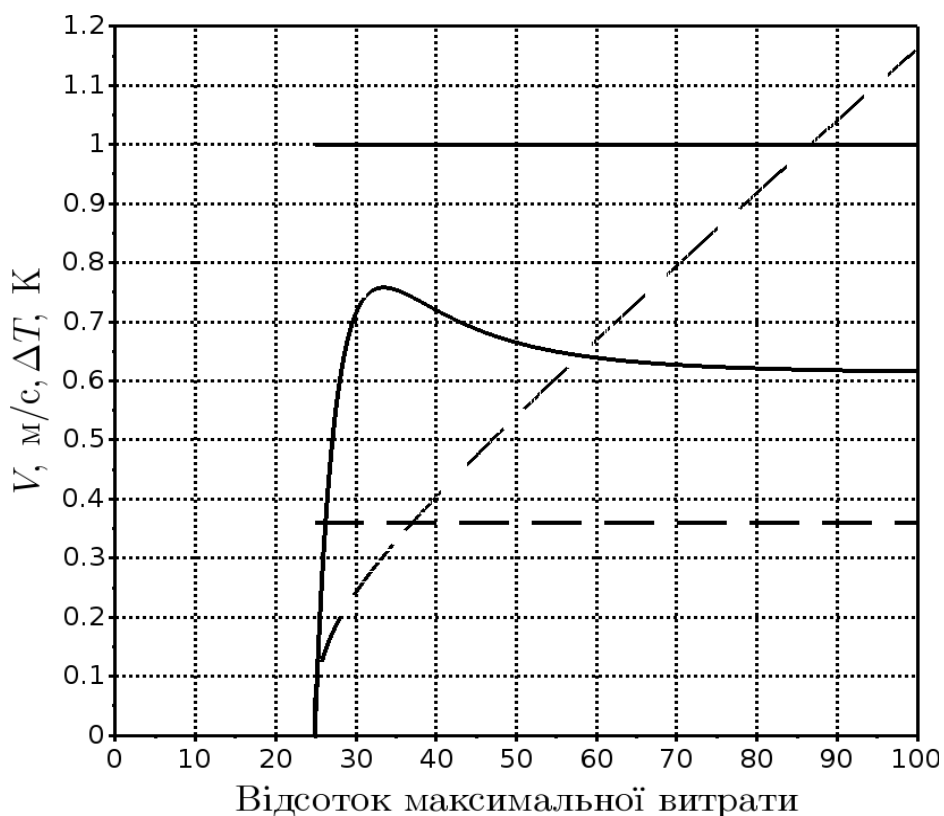


Рис 7. Параметри струмини на вході до робочої зони за схемою А при подаванні нагрітої струмини:

— — — швидкість V , м/с, — — надлишкова температура ΔT , К, м/с

Для створення математичної моделі повітряних потоків було обрано три схеми подачі повітря: Б та В. Для приміщення виставкової зали виконано моделювання розподілу температури, швидкості та відносної вологості повітря на висоті 1,5 м (місце розміщення картин) [3, 6]. З рис. 8-19 видно, що параметри повітря відповідають нормативним. Це підтверджує як результати розрахунку, так і правильність обраних схем подавання повітря.

Висновки. Математичне моделювання розвитку струмин за аналітичними залежностями та методами обчислювальної гідродинаміки показали, що подача повітря охолодженою віяловою струминою з робочим перепадом температури 5 К за схемою Б забезпечує оптимальні параметри мікроклімату в робочій зоні музейної зали. Подача нагрітого повітря цим способом повністю порушує режим циркуляції, через спливання струмини. Зменшення навантаження вимагає зміни струмини на вісесиметричну з подальшим регулюванням площі випуску повітря залежно від продуктивності системи. Подача охолодженого повітря вісесиметричною струминою за схемою А доцільне лише при зменшенні навантаження до 25% і менше.

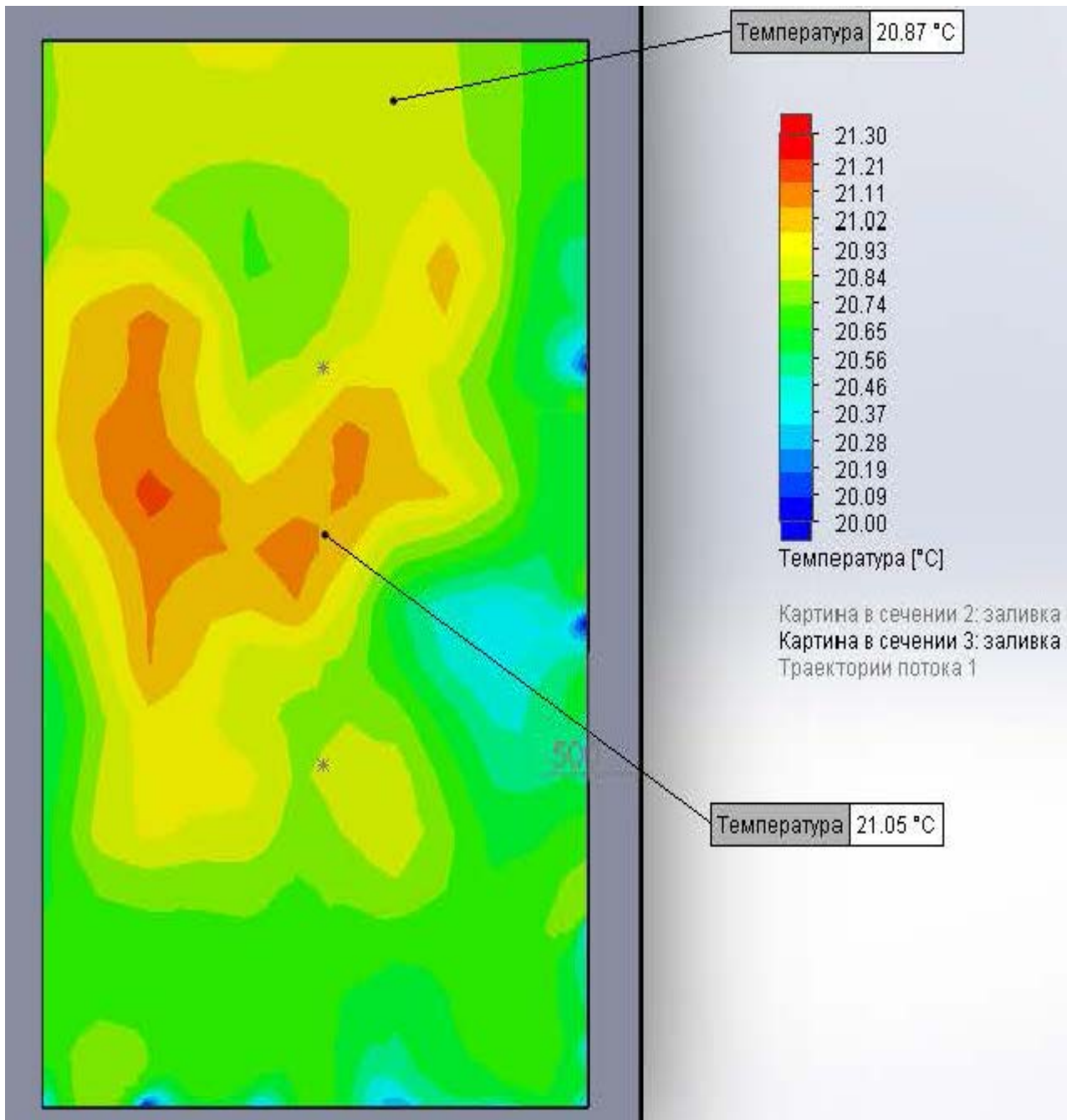


Рис 8. Розподіл температури повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 100%, схема подачі повітря Б

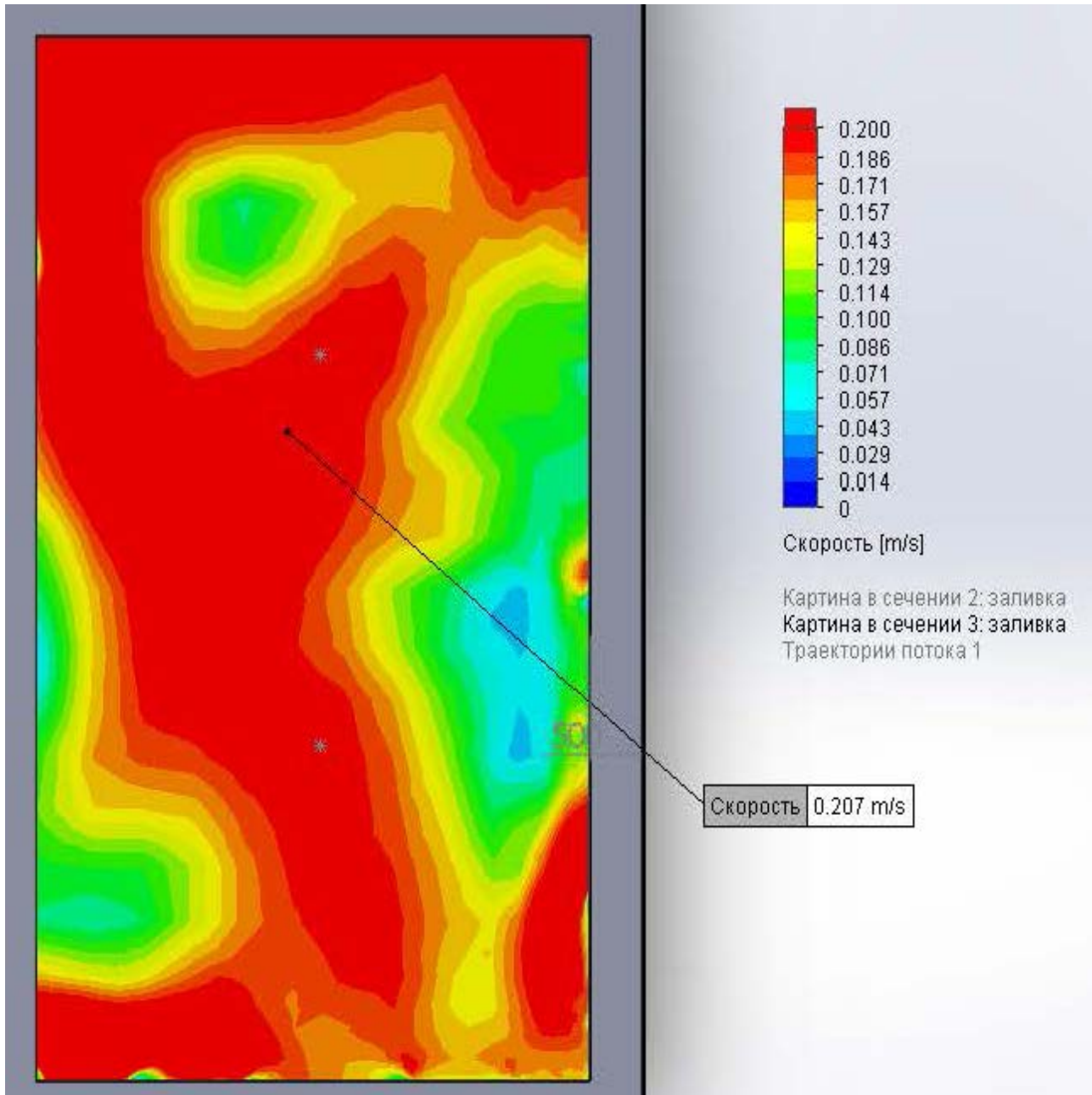


Рис 9. Розподіл швидкості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 100%, схема подачі повітря Б

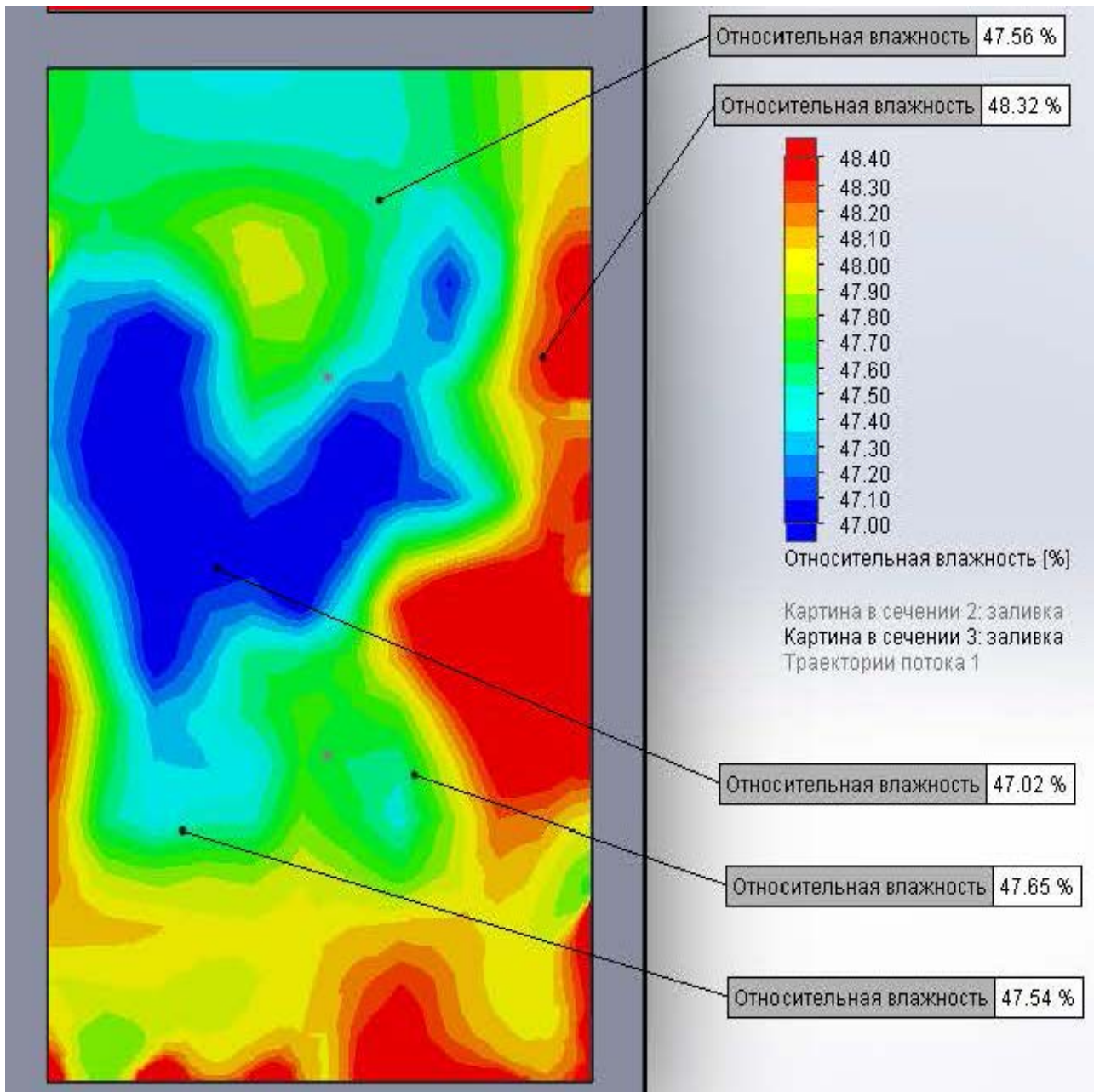


Рис 10. Розподіл відносної вологості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 100%, схема подачі повітря Б

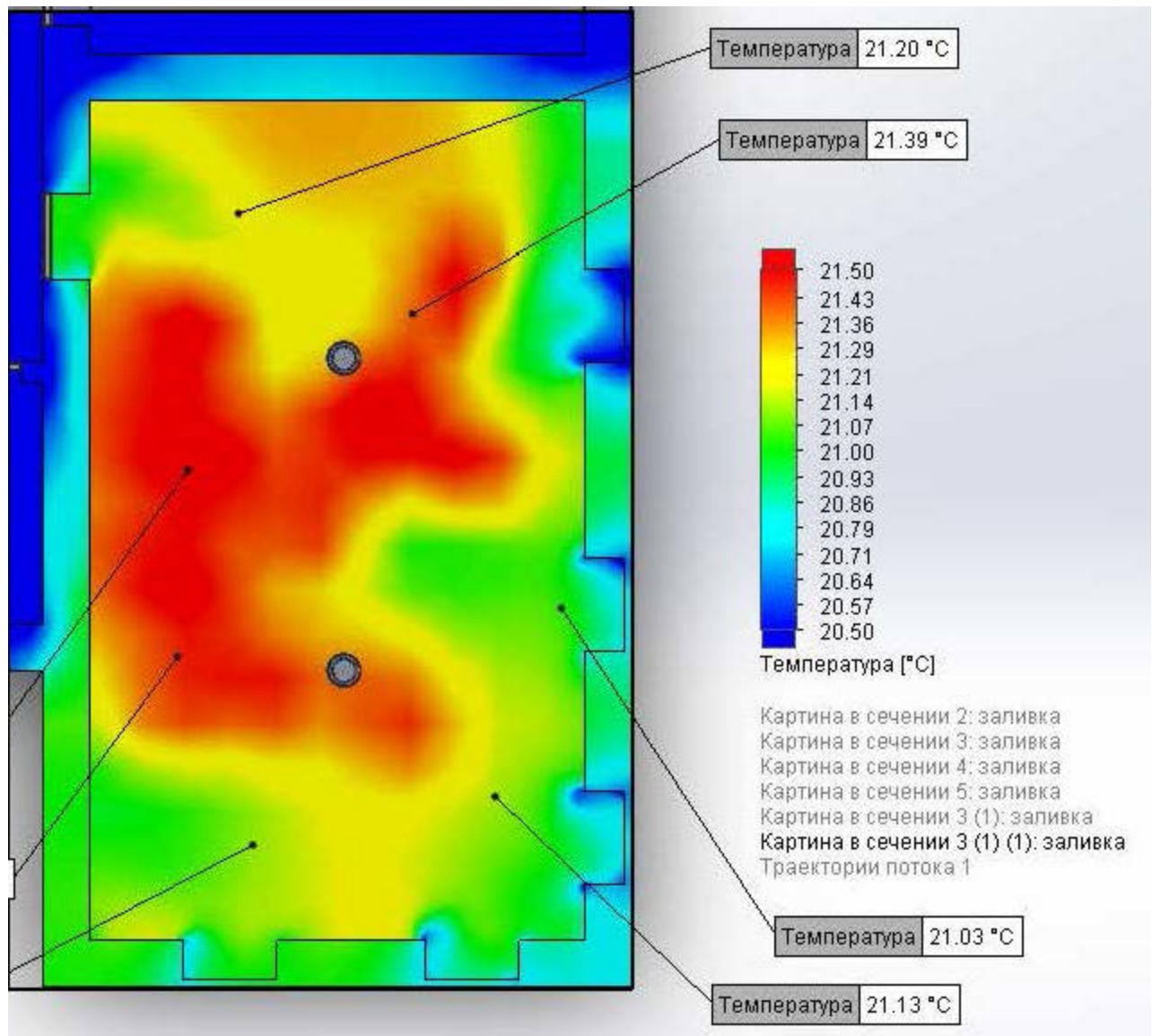


Рис 11. Розподіл температури повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 50 %, схема подачі повітря Б

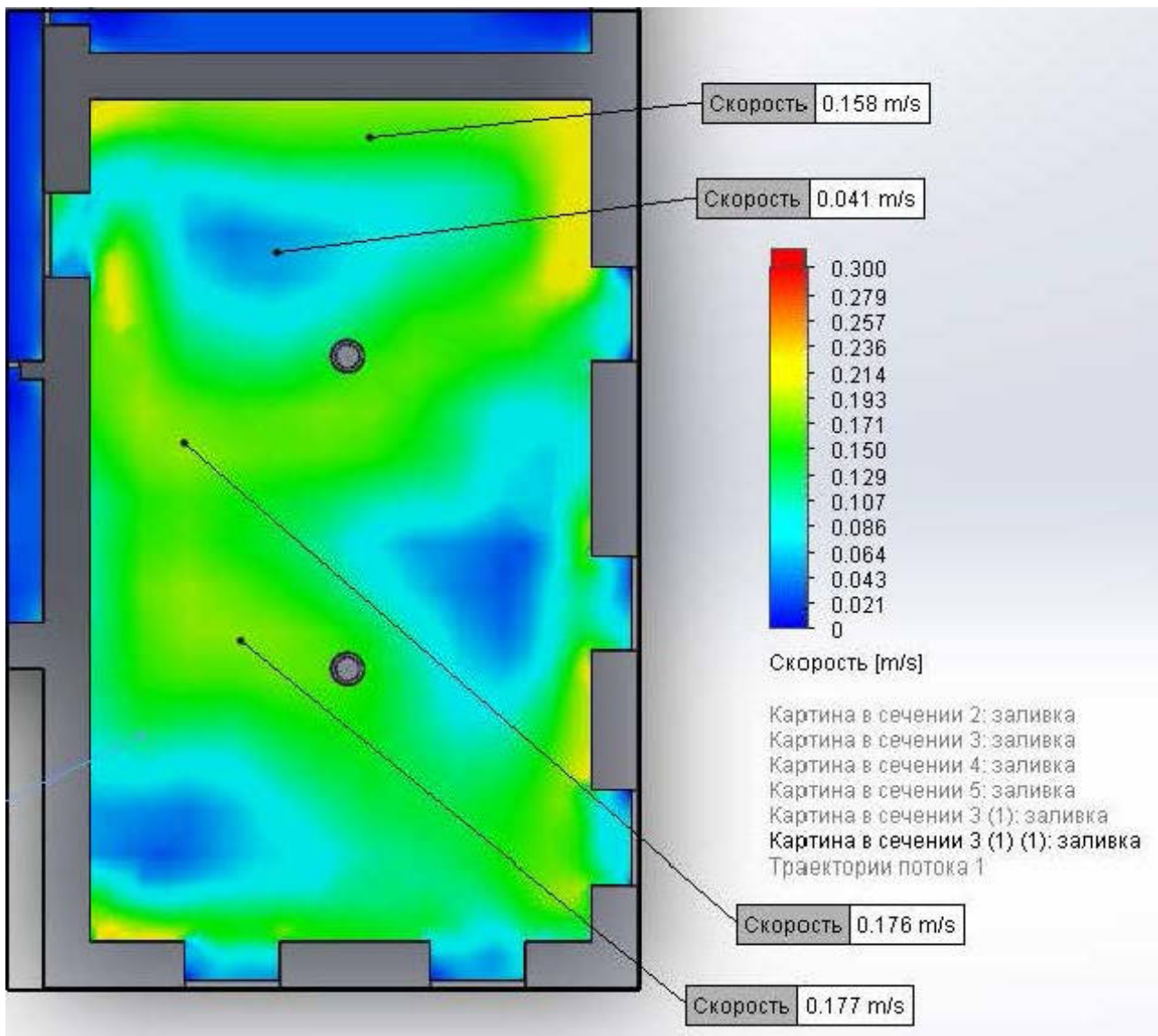


Рис 12. Розподіл швидкості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 50 %, схема подачі повітря Б

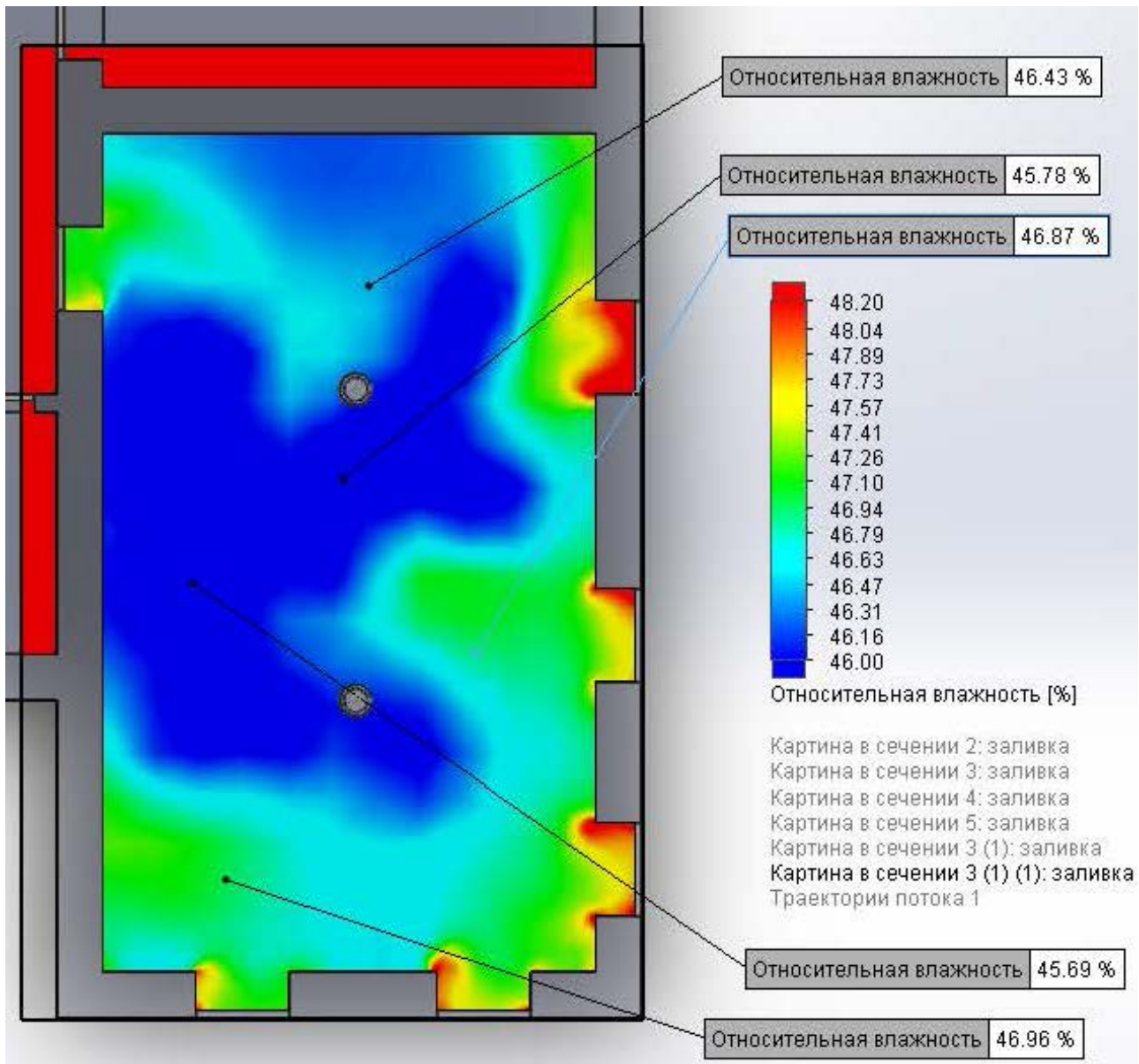


Рис 13. Розподіл відносної вологості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 50 %, схема подачі повітря Б

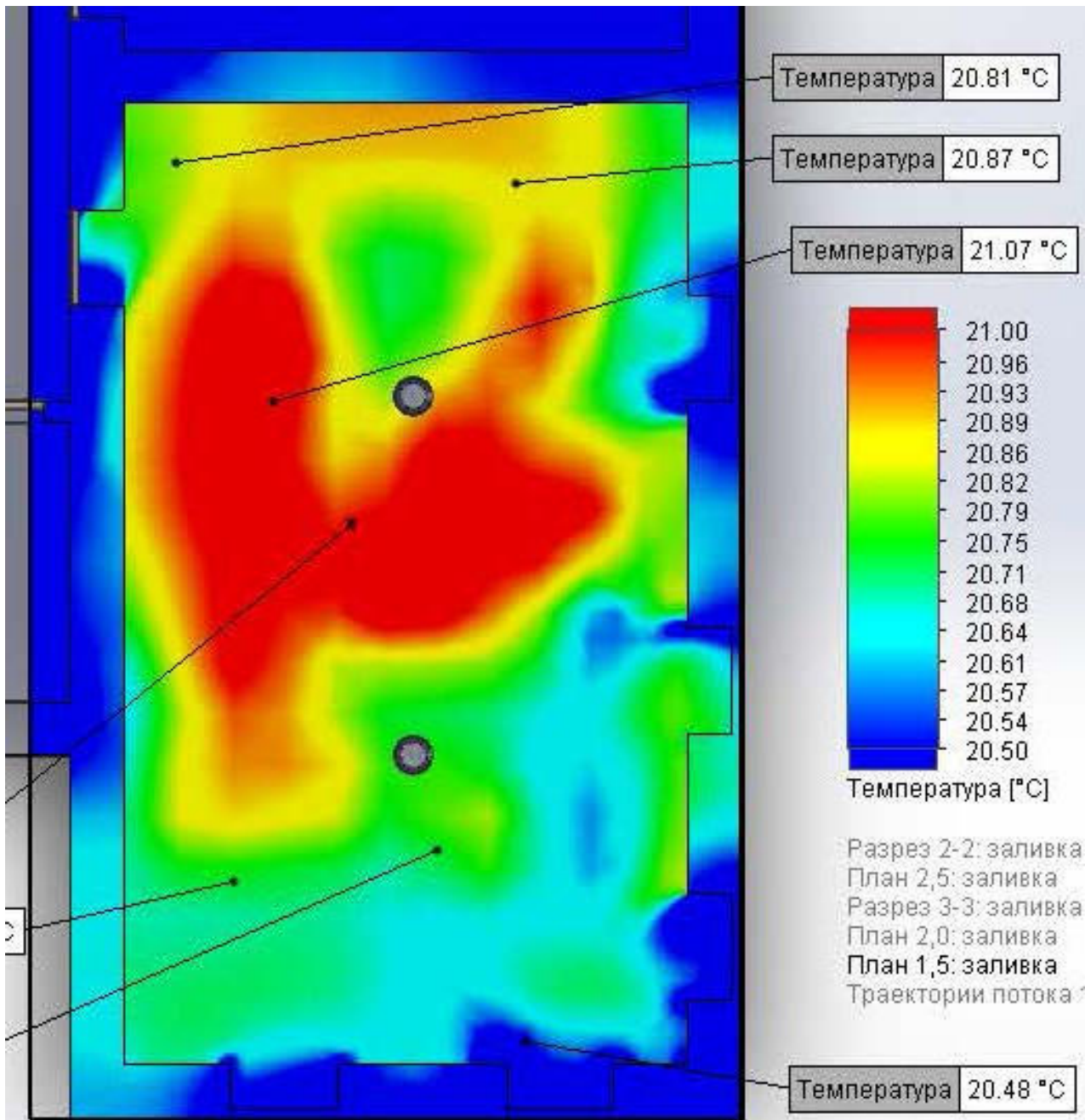


Рис 14. Розподіл температури повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 100 %, схема подачі повітря В

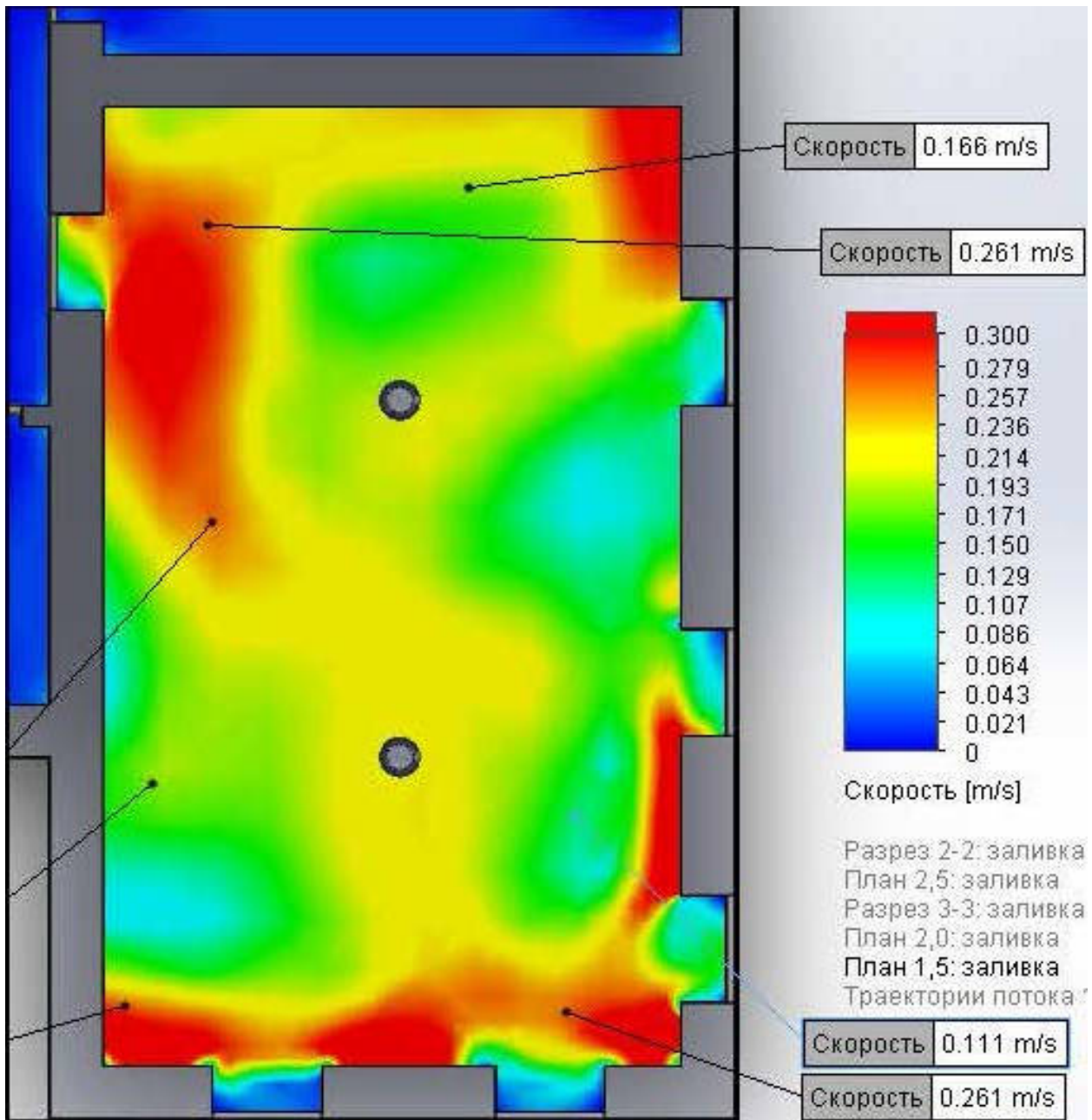


Рис 15. Розподіл швидкості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 100 %, схема подачі повітря В

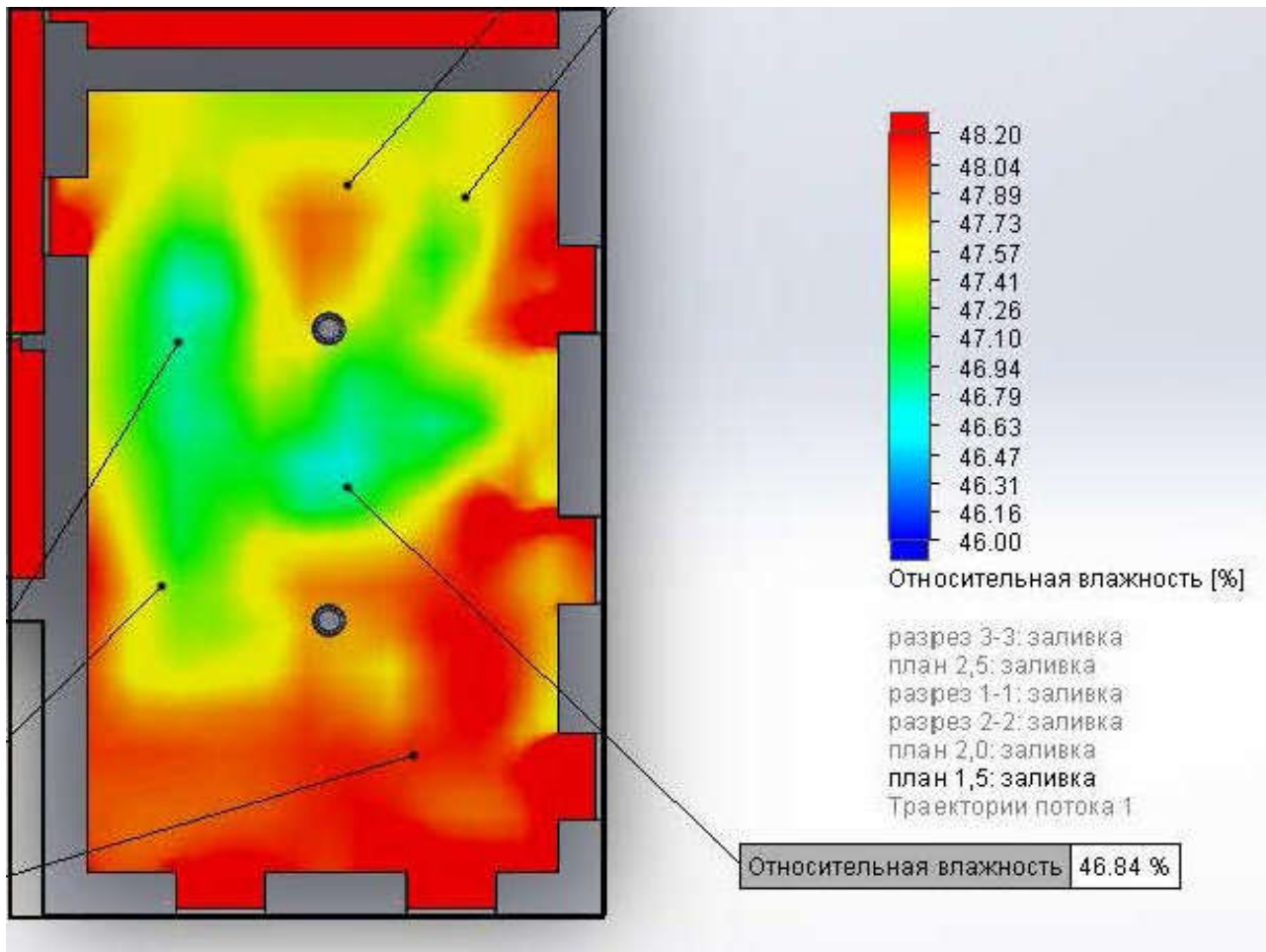


Рис 16. Розподіл відносної вологості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 100 %, схема подачі повітря В

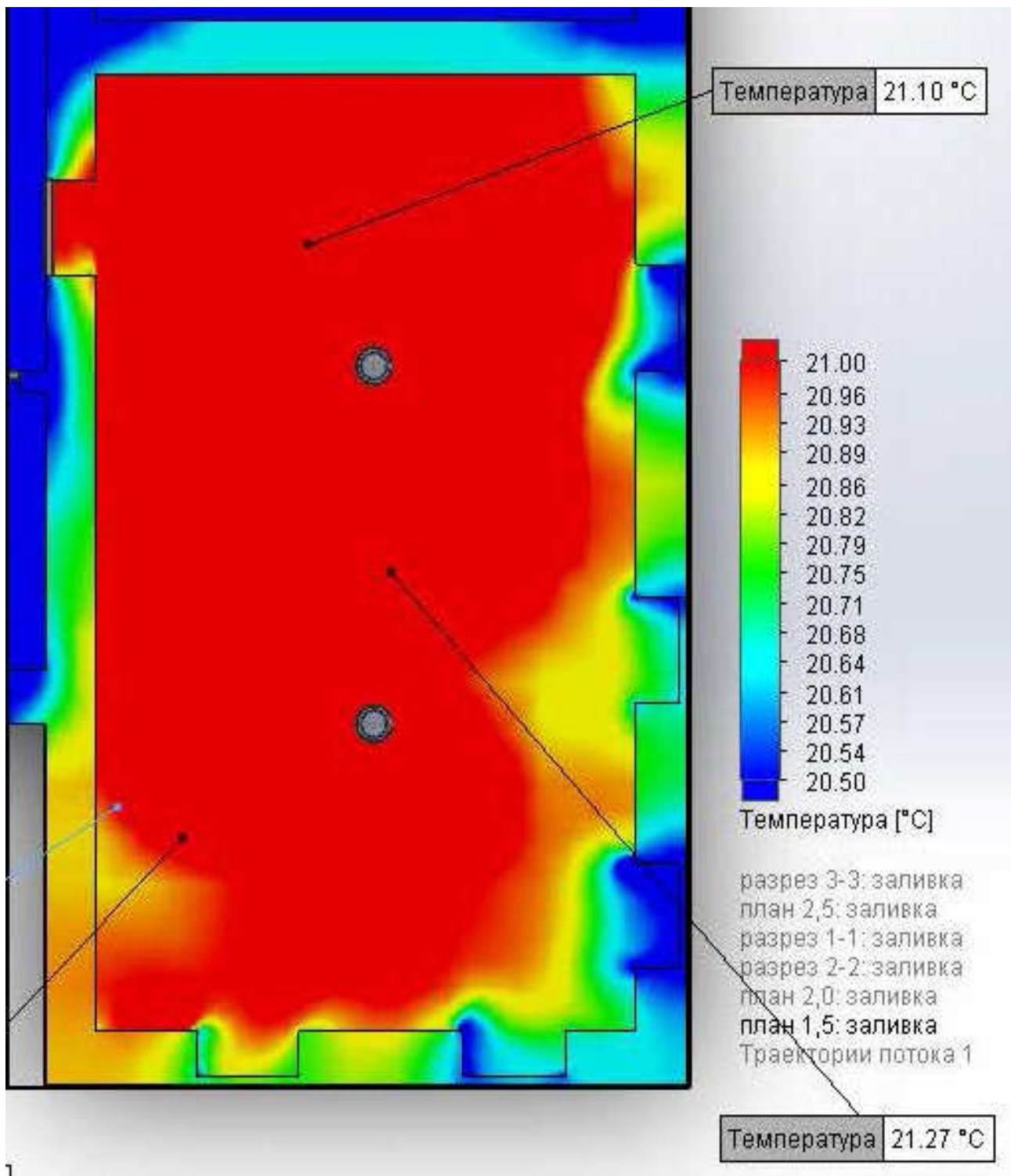


Рис 17. Розподіл температури повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 50 %, схема подачі повітря В

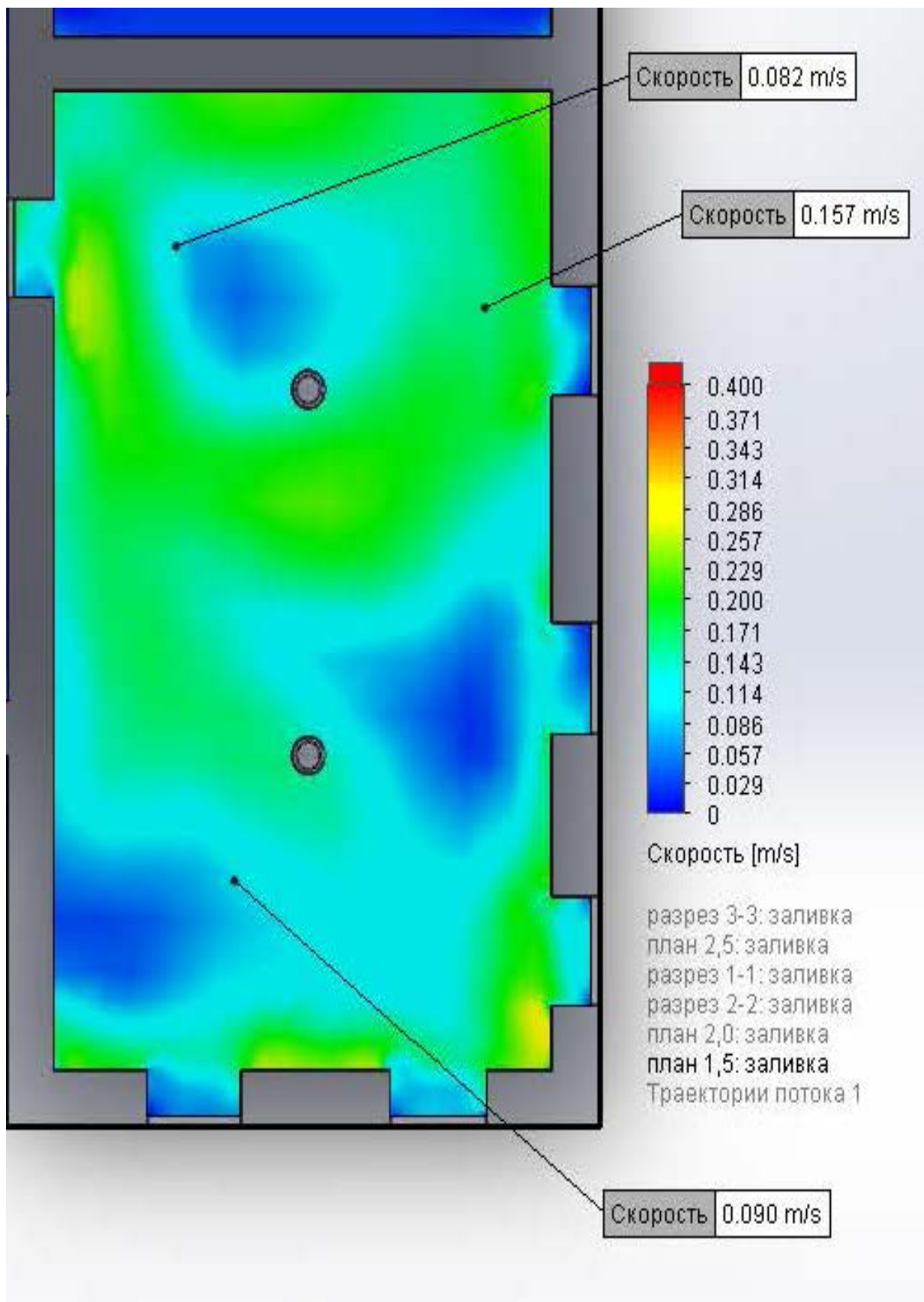


Рис 18. Розподіл швидкості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 50 %, схема подачі повітря В

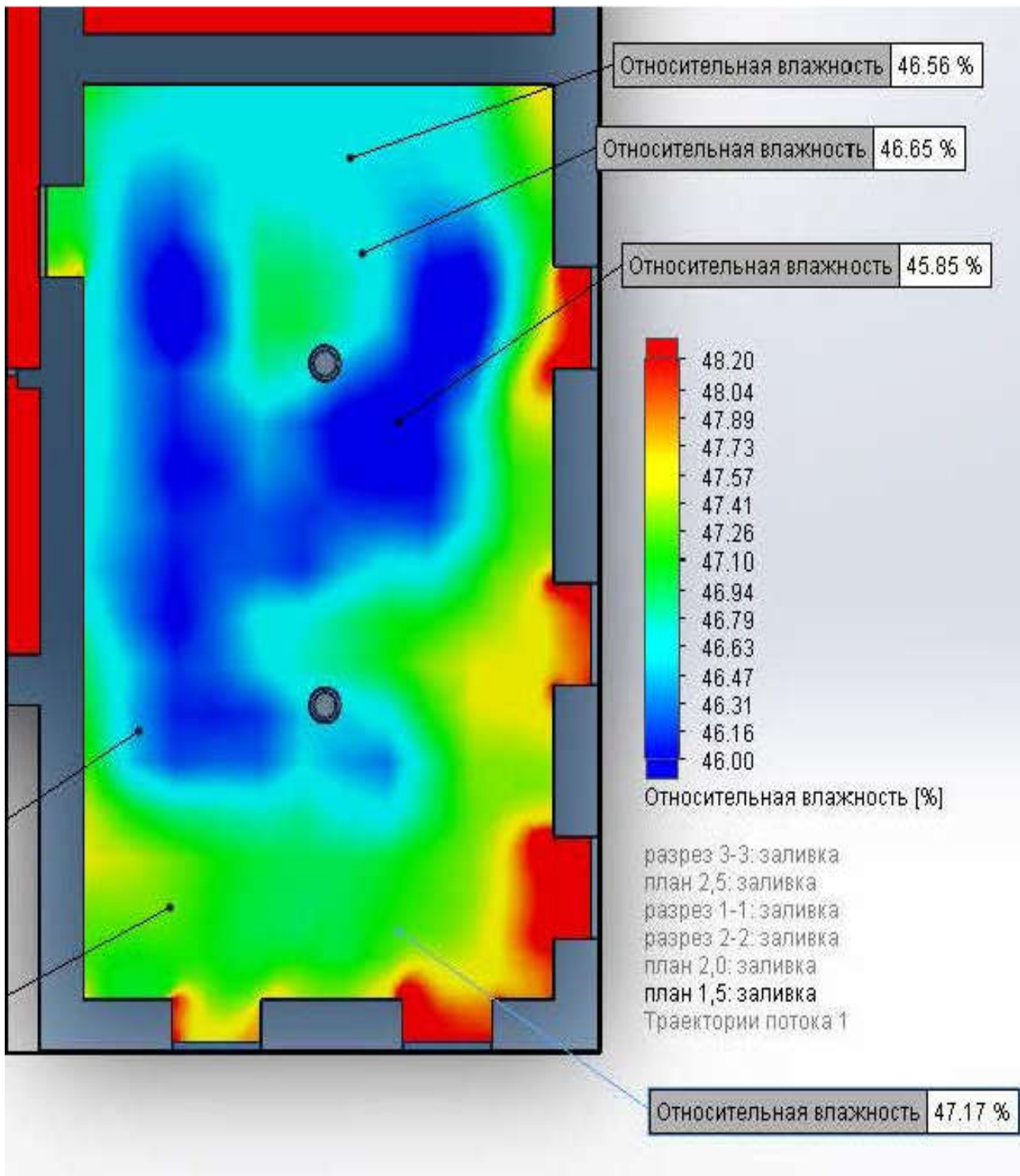


Рис 19. Розподіл відносної вологості повітря в плані на висоті 1,5 м. від підлоги при витраті 50 %, схема подачі повітря В

References

1. Dovhaliuk V.B., Komarenko O.I., Mytkivska T.I. Mikroklimat muzeinykh prymishchen. Artaniia Nova, 2006. (In Ukrainian).
2. Dovhalyuk V.B., Chovnyuk Yu.V., Sklyarenko O.M., Sytnytska A.K. “Enerhoefektyvni tekhnolohiyi orhanizatsiyi povitrorozpodilu v muzeyakh riznoho pryznachennya pry zminnykh rezhymakh teplovologonadhozhennya”. Ventylyatsiya, osviltennya ta teplogazopostachannya: nauk.-tekhn. zb., iss. 32, 2020. – Vyp. 32, pp. 6-16 (in Ukrainian).
3. Sukholova I., Vozniak O. “Modeliuvannia povitrorozpodilu v prymishchenni u zminnomu rezhymi za dopomohoiu modeli turbulentnosti Spalarta-Almarasa”. Visnyk NU “LP” “Teoriia i praktyka budivnytstva”, iss. 844, 2016, pp. 26-33 (in Ukrainian).
4. Dovhaliuk V. Aerodynamika ventyliatsii. Ukrheliotekh, 2020 (in Ukrainian)
5. Grymitlin M. Raspredelenie vozdukhа v pomesheniakh. Stroizdat, 2020 (in Russian)
6. Vozniak O. “Vplyv vzaiemodii strumyn na povitrorozpodil u prymishchenni”. Visnyk NU «Lvivska Politekhnikа» Teploenerhetyka, inzheneriia dovkillia, avtomatyzatsiia, 2001. pp 27-31 (in Ukrainian)
7. Vakhula V. R. “Proektuvannya systemy vytisnyayuchoyi ventyliatsiyi v muzeynykh prymishchennyakh”. Ventyliatsiia, osviltennya ta teplogazopostachannya, iss. 44, 2023, pp. 5-11 (in Ukrainian)

professor **Viktor Mileikovskiy**,
mileikovskiy.vo@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8543-1800
assistant **Volodymyr Vakhula**,
v.vahula@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7973-6421
assistant **Oleksii Dudnikov**,
dudnikov.oa@knuba.edu.ua, ORCID: 0009-0000-2656-2683
Kyiv National University of Construction and Architecture

THEORETICAL STUDIES OF AIR EXCHANGE ORGANISATION USING MULTI-FLOW AIR DISTRIBUTORS

***Abstract.** One of the most important aspects of ensuring optimal conditions in museums is the air conditioning systems. Traditional ventilation and air conditioning systems with a constant air flow rate may not be effective. In the context of optimising the microclimate in museums, it is crucial to implement technological standards and requirements aimed at stabilising the temperature and humidity conditions. It is important to note that the conditions for the preservation of museum exhibits require*

that the temperature (16-24 °C, optimally 18-22 °C) and humidity (55% ± 5%) regimes remain constant. Multi-jet air distributors in variable flow systems are one of the modern approaches that can provide optimal parameters for museum premises. The paper considers theoretical studies of a multi-jet air distributor that can create axisymmetric and fan-like jets, as well as combine these jets together. The formula for the coefficient of non-isothermicity of the jets fed vertically against the influence of gravitational forces was refined in accordance with experimental data. Three schemes of air supply vertically downward were modelled: axisymmetric jet, fan-like jet, and both jets. For the exhibition hall, the distribution of temperature, air velocity and relative humidity at a height of 1.5 m (the place where the paintings are placed) was modelled. The results showed that the supply of a compact cool jet is effective only at an air flow rate of 25 %. The supply of a fan-shaped cooled jet ensures that the air parameters are within the standard range. The heated fan-like jet floats away and does not reach the working area. The heated axis-symmetric jet requires adjustment of the air outlet area. The results allow recommending air supply by cooled fan-shaped jets from 25 to 100 %. For lower flow rates, the axis-symmetrical jets are more appropriate. Heated jets should be axis-symmetrical with enough control of the initial area.

Key words: multi-jet air distributor, museum, microclimate, ventilation, air conditioning, variable air flow, regulation degree, mathematical model.