

DOI 10.15589/jnn20170110  
 УДК 629.12.03  
 P93

## DEVELOPMENT OF SHIP SYSTEMS FOR CLEANING AIR FROM CONDENSED MOISTURE

## РОЗРОБКА СУДНОВИХ СИСТЕМ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ ВІД КРАПЛИННОЇ ВОЛОГИ

Serhiy S. Ryzhkov  
 sergiy.ryzhkov@nuos.edu.ua  
 ORCID: 0000-0002-2201-6172

С. С. РИЖКОВ,  
 канд. техн. наук

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*  
*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

**Abstract.** The study of gas dynamics and precipitation coefficients of the separation profile has been performed. The three-dimensional model of operating channels of the ship systems for cleaning air from condensed moisture is developed. The distribution of velocity, static pressure, dynamic pressure, turbulence kinetic energy, and precipitation coefficients for the flow rates of 5, 10, 15, 20 m/s in separating profiles with the radii of 5, 10, 15, 20, 25 mm. The condensed moisture precipitation coefficient is 99.9%. Designs of the ship systems for cleaning air from condensed moisture are developed for the air flow from 20 to 2000 m<sup>3</sup>/hour.

**Keywords:** separator; air cleaning systems; moisture separator; 3D modeling.

**Анотація.** Виконано дослідження газодинаміки та коефіцієнтів осадження сепараційного профілю. Розроблено тривимірні моделі робочих каналів суднових систем очищення повітря від краплинної вологи. Отримано розподіл швидкості, статичного тиску, динамічного тиску, кінетичної енергії турбулентності та коефіцієнтів осадження для швидкостей потоку 5, 10, 15, 20 м/с у сепаруючих профілях з радіусами 5, 10, 15, 20, 25 мм. Розроблено конструктивні рішення суднових систем очищення повітря від краплинної вологи для витрат повітря від 20 до 2000 м<sup>3</sup>/год.

**Ключові слова:** сепаратор; системи очищення повітря; вологовіддільник; 3D моделювання.

**Аннотация.** Выполнены исследования газодинамики и коэффициентов осаждения сепарационного профиля. Разработаны трехмерные модели рабочих каналов судовых систем очистки воздуха от капельной влаги. Получено распределение скорости, статического давления, динамического давления, кинетической энергии турбулентности и коэффициентов осаждения для скоростей потока 5, 10, 15, 20 м/с в сепарирующих профилях с радиусами 5, 10, 15, 20, 25 мм. Разработаны конструктивные решения судовых систем очистки воздуха от капельной влаги для расхода воздуха от 20 до 2000 м<sup>3</sup>/ч.

**Ключевые слова:** сепаратор; системы очистки воздуха; влагоотделитель; 3D моделирование.

### REFERENCES

- [1] Belousov V. V. *Teoreticheskiye osnovy protsessov gazoochistki* [Theoretical foundations of gas cleaning processes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 256 p.
- [2] Ryzhkov S. S., Basok B. I. *Ekologicheskiye resursoberegayushchiye tekhnologii dlya promyshlennoy teplotekhniki na osnove dispersnykh dvukhfaznykh sred* [Ecological resource-saving technologies for industrial heat engineering based on dispersed two-phase media]. *Promyshlennaya teplotekhnika — Industrial heat engineering*, 2001, no. 4–5, pp. 141–145.
- [3] Van-Dayka M. *Techeniye zhidkosti i gaza* [Liquid and gas flow]. Moscow, Mir Publ., 1986. 114 p.
- [4] Rayst P. *Aerозoli. Vvedeniye v teoriyu* [Aerosols. Introduction to the theory]. Moscow, Mir Publ., 1987, pp. 34–40.
- [5] Mednikov Ye. P. *Turbulentnyy perenos i osazhdeniye aerозoley* [Turbulent transfer and deposition of aerosols]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 176 p.
- [6] Kalvert S., Inglund G. M. *Zashchita atmosfery ot promyshlennykh zagryazneniy: Spravochnik Ch. 1* [Protection of the atmosphere from industrial pollution: Handbook Ch 1]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 760 p.
- [7] Ryzhkov S. S., Kharytonov Yu. M., Blahodatnyi V. V. *Metody ochyshchennia povitrianoho seredovishcha vid zabrudnen* [Methods for cleaning the air environment from pollution]. Mykolaiv, UDMTU Publ., 2002. 56 p.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Створення комфортних умов у житлових і службових приміщеннях судна, а також підтримання необхідних технологічних параметрів у виробничих приміщеннях вимагає очищення повітря від краплинної вологи. Надходження краплинної вологи в повітропровід викликає появу вогкості в кондиціонованих приміщеннях, інтенсивну корозію обладнання, що може призвести до скупчення вологи в окремих місцях і т. д. Для збільшення ефективності й зменшення габаритів судових систем очищення повітря від краплинної вологи доцільно розробляти конструкції з найбільш ефективними поверхнями осадження за рахунок сепараційних градієнтних аерозольних технологій. Розробка моделей і методів дослідження, які дозволять здійснити розрахунки газодинаміки в робочих каналах систем очищення й розрахувати коефіцієнти осадження для всього робочого діапазону обладнання, створить основу для проектування судових систем очищення повітря від краплинної вологи.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У даний час застосовуються сепаратори інерційного типу, сепаруючі елементи яких мають краплевідбійні планки, або є порожніми з внутрішнім дренаванням краплинної вологи [1]. Випробування краплевловлювачів, що описані в [2], показали їх недостатню сепаруючу здатність, підвищений аеродинамічний опір. Крім того, виготовлення таких сепаруючих елементів характеризується великим обсягом робіт, що не піддаються механізації. Одним з напрямів їх вирішення є розробка високоефективних градієнтних сепараторів аерозольних середовищ для судових енергетичних установок. Створення технологій з розділення аерозольних середовищ з використанням нових методів уловлювання фаз є значним резервом енерго-збереження. Має перспективу розробка інноваційних методів з використанням градієнтної інтенсифікації процесів переносу в прикордонних шарах багатофункційних поверхонь для енергетичних установок. До багатофункційних поверхонь належать поверхні з коефіцієнтом компактності більше ніж  $2000 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , які мають підвищені теплообмінні та сепаруючі властивості. Використання методів і способів проектування й впровадження фільтрів на основі градієнтних технологій дозволить підвищити надійність, ресурс судового енергетичного обладнання та його елементів. Це поліпшить створення високоефективних енергоресурсозберігаючих технологій й ефективних конструктивних рішень для широкого класу градієнтних сепараторів судових енергетичних установок [5].

**МЕТА СТАТТІ** — розробка судових систем очищення повітря від краплинної вологи.

Мета досягається за умови вирішення таких задач:

1) виконання математичного моделювання процесів при початкових швидкостях 5, 10, 15, 20 м/с на основі сепараційних градієнтних аерозольних технологій за різних швидкостей потоку в сепаруючих профілях з радіусами 5, 10, 15, 20, 25 мм;

2) розрахунок розподілу швидкості, статичного тиску, динамічного тиску, кінетичної енергії турбулентності та коефіцієнтів осадження на основі сепараційних градієнтних аерозольних технологій для швидкостей потоку 5, 10, 15, 20 м/с у сепаруючих профілях з радіусами 5, 10, 15, 20, 25 мм;

3) визначення коефіцієнта осадження краплинної вологи для швидкостей потоку 5, 10, 15, 20 м/с в сепаруючих профілях з радіусами 5, 10, 15, 20, 25 мм;

4) розробки конструктивних рішень судових систем очищення повітря від краплинної вологи для витрат повітря від 20 до 2000  $\text{м}^3/\text{год}$ ;

5) розробки та затвердження креслень для модельного ряду судових систем очищення повітря від краплинної вологи;

6) розробки та затвердження стандарту підприємства для модельного ряду судових систем очищення повітря від краплинної вологи.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

**Математичні моделі процесів.** Рівняння транспорту напружень Рейнольдса,  $\rho u'_i u'_j$  можуть бути записані у вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u'_i u'_j}) + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + G_{ij} + \varphi_{ij} - \varepsilon_{ij} + F_{ij} + S_{user}, \quad (1)$$

де  $\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u'_i u'_j})$  — часткова похідна часу;  $C_{ij} \equiv$

$\equiv \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j})$  — конвективна складова;  $D_{T,ij} \equiv -\frac{\partial}{\partial x_k} \times [\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)]$  — турбулентна дифузія;

$D_{L,ij} \equiv -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right]$  — ламінарна дифузія;

$P_{ij} \equiv -\rho \left( \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right)$  — утворення напруженості;  $G_{ij} \equiv -\rho \beta \left( g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta} \right)$  — утворення виштов-

хуючої сили;  $\varphi_{ij} \equiv p \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)$  — напруження тис-

ку;  $\varepsilon_{ij} \equiv 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}$  — дисипація;  $F_{ij} \equiv -2\rho \Omega_k \times$

$\times (\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm})$  — утворення обертання системи;

$S_{user}$  — член, що задається користувачем.

Рівняння енергії, що отримане на базі цієї теорії має вигляд:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

де  $E$  — повна енергія;  $(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$  — девіаторний тензор напружень.

Рівняння турбулентного масопереносу моделюється шляхом заміни в рівнянні (2) ентальпії на концентрацію часток дисперсного багатозфазного потоку:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho C) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho C)] = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( D + \frac{\mu_t}{\rho Pr_{t,D}} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Рівняння нерозривності для потоку без джерел часток за постійної щільності рідини має вигляд:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0. \quad (4)$$

Рівняння динаміки руху частинок у газовому потоці записувалось таким чином:

$$\frac{\partial u_p}{\partial x_i} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_D. \quad (5)$$

У рівнянні руху (5)  $x_i$  — величина часу, сили на одиницю маси частинки  $F_1 = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_k} \frac{\partial}{\partial t} (u - u_k)$  — інер-

ції,  $F_2 = -0,5 m_k \frac{\partial u_k^2}{\partial y}$  — турбофорезу,  $F_3 = \left( \frac{P}{P_w} \right) u_k \frac{\partial u}{\partial x}$  —

дифузіїфоретична,  $F_4 = \frac{2K v^{1/2} \rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{ik} d_{kl})} (v - v_p)$  —

підйомна Саффмана та  $\bar{F}_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D}{24} Re$  — опору,

де  $P_w$  — значення тиску на стінці,  $p$  — тиск потоку,  $d_p$  — діаметр частинки,  $\rho_p$  — густина частинки,  $v_p$  — швидкість частинки,  $\rho$  — густина багатозфазних сумішей палив підвищеного тиску,  $v$  — швидкість газу,

$d_{ij}$  — тензор деформації,  $K = 2,594$ ,  $Re = \rho d_p \frac{|u_p - u|}{\mu}$  —

число Рейнольдса,  $u$  — початкова швидкість потоку;

$u_p$  — швидкість частинки;  $\mu$  — молекулярна в'язкість потоку;  $\rho$  — густина потоку;  $\rho_p$  — густина частинки;  $d_p$  — діаметр частинки, коефіцієнт опору:

$$C_D = \frac{24}{Re} \left( 1 + b_1 Re^{b_2} \right) + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re}, \quad (6)$$

$b$  — поліноміальні коефіцієнти, що задаються.

З наведених вище виразів  $C_{ij}$ ,  $D_{L,ij}$ ,  $P_{ij}$  і  $F_{ij}$  розраховується безпосередньо, а  $D_{T,ij}$ ,  $G_{ij}$ ,  $\Phi_{ij}$ ,  $\epsilon_{ij}$  моделюються у формі, яка дозволяє замкнути систему рівнянь. Способи, які використовувалися при їх моделювання детально наведено в [8–10].

Обчислення інтенсивності процесу очищення за результатами рішення виконується за масовим —  $Km$ , гідродинамічним —  $K\gamma$  і енергетичним —  $Ke$  коефіцієнтами інтенсифікації осадження. Принципи визначення цих коефіцієнтів базуються на максимізації маси осаджених частинок і мінімізації геометричного об'єму процесів і механічної роботи перенесення часток відносно затрат внутрішньої й зовнішньої енергій. На підставі цих принципів комплексний показник інтенсивності процесу очищення  $KIO$  дорівнює:

$$KIO = 1 - (1 - Km)(1 - K\gamma)(1 - Ke), \quad (7)$$

де

$$Km = (\Sigma M_{ivx} - \Sigma M_{ivix}) / \Sigma M_{ivx}, \quad (8)$$

$$K\gamma = (\Sigma Vi - \Sigma V_{i3}) / \Sigma Vi, \quad (9)$$

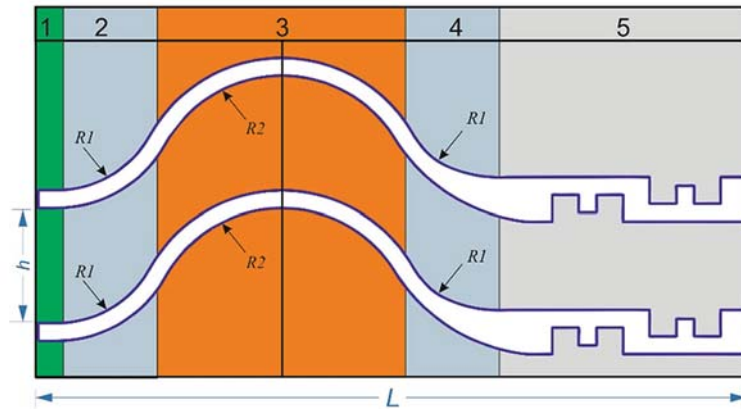
$$Ke = 1 - (A + L) / (E_b + E_s), \quad (10)$$

$\Sigma M_{ivx}$ ,  $\Sigma M_{ivix}$  — відповідно сумарна маса часток розміром  $i$  на вході й виході ділянки;  $\Sigma Vi$ ,  $\Sigma V_{i3}$  — відповідно сумарний об'єм, де відбувається очищення і де воно відсутнє;  $A = \Sigma lF$  — сумарна робота перенесення часток на ділянці довжиною  $l$  під впливом сил  $F$ ;  $L = G[\Delta(pv) + \Delta(w^2/2) + g\Delta h] + L_i + L_f$  — робота, що здійснюється потоком витратою  $G$ ;  $E_b = \Delta(c_p t G \tau)$  витрати внутрішньої енергії потоку і  $E_s$  — витрати зовнішньої енергії.

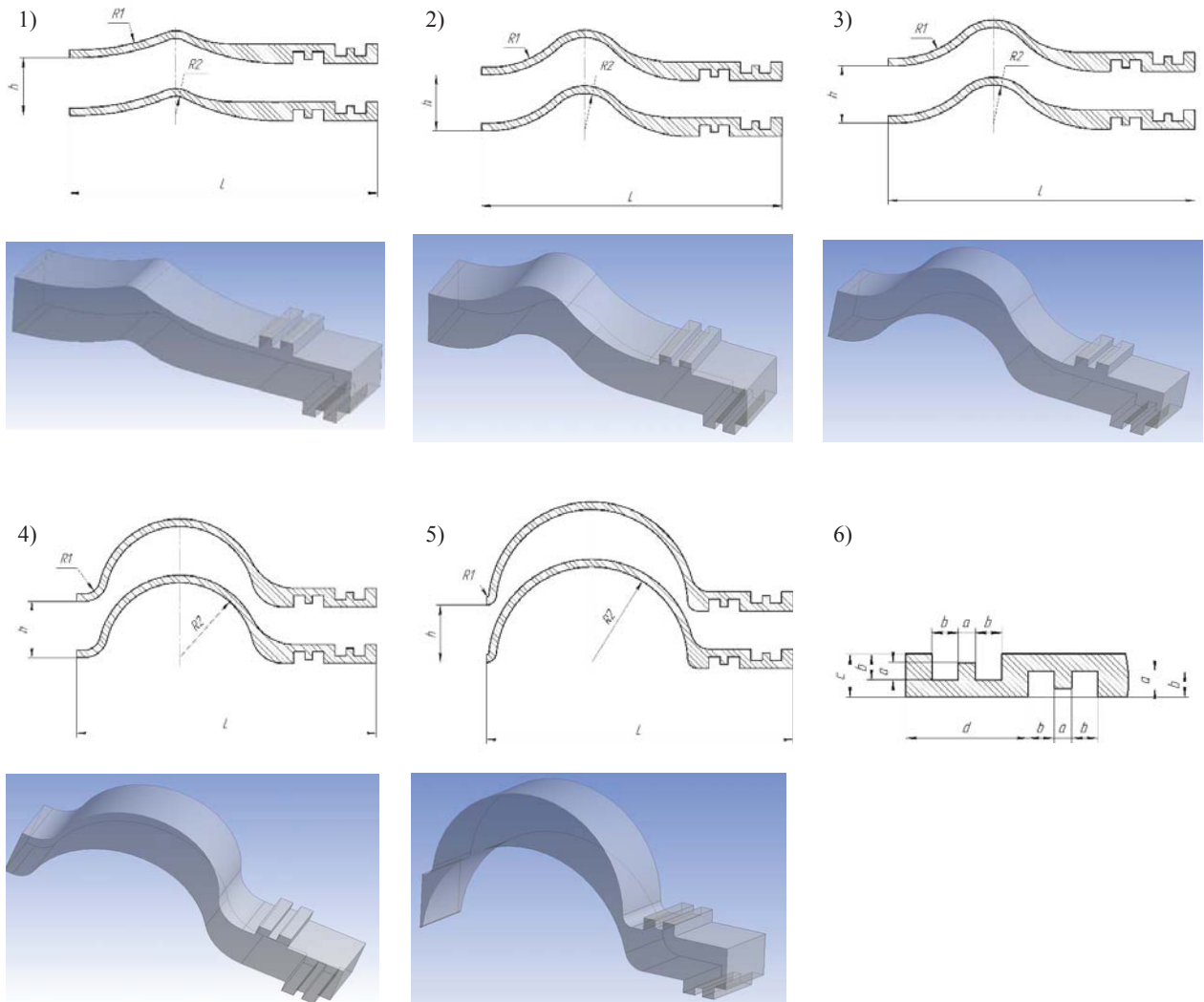
**Результати дослідження.** Для розробки суднових систем очищення повітря від краплинної вологи досліджено сепаруючий профіль (рис. 1) з такими параметрами:  $R1 = (0,05 \div 0,5) \cdot L$ ;  $h = (0,5 \div 5) \cdot R1$ ;  $R2 = (0,01 \div 1,0) \cdot L$ .

Розглянуто профіль довжиною — 80 мм, кількість відвідних канавок — дві зверху профілю й дві знизу профілю (розмір канавки: довжина — 3 мм та висота 2 мм), проаналізовано й обрано радіус кривизни профілю — 5, 10, 15, 20, 25. Для вивчення сепаруючих профілів побудовано розрахункові сітки у тривимірній постановці (рис. 2).

На основі математичної моделі процесів для розрахунку системою рівнянь визначено початкові й граничні умови, які дозволили здійснити розрахунок основних параметрів сепаруючого профілю. Для точності розрахунків використовувався критерій збігу



**Рис. 1.** Схема побудови сепаруючих профілей з різними радіусами кривизни й розмірами:  
 $R1 = (0,05 \div 0,5) \cdot L$ ;  $h = (0,5 \div 5) \cdot R1$ ;  $R2 = (0,01 \div 1,0) \cdot L$ ; 1 — вхід у профіль; 2 — зона R1; 3 — зона R2; 4 — зона R1; 5 — зона уловлювання



**Рис. 2.** Розрахункова сітка в тривимірній постановці робочій геометрії сепаруючого профілю:  
 1)  $R1 = 60$  мм,  $R2 = 5$  мм,  $h = 15$  мм,  $L = 80$  мм; 2)  $R1 = 25$  мм,  $R2 = 10$  мм,  $h = 15$  мм,  $L = 80$  мм; 3)  $R1 = 12$  мм,  $R2 = 15$  мм,  $h = 15$  мм,  $L = 80$  мм; 4)  $R1 = 4$  мм,  $R2 = 20$  мм,  $h = 15$  мм,  $L = 80$  мм; 5)  $R1 = 1$  мм,  $R2 = 25$  мм,  $h = 15$  мм,  $L = 80$  мм; 6)  $a = 2$  мм,  $b = 3$  мм,  $c = 5$  мм,  $d = 14$  мм

розрахунку  $10^{-4}$  для перемінних швидкості, вимог нерозривності потоку, кінетичної енергії турбулентності й напружень Рейнольдс.

У процесі розрахунку задавались такі параметри:

- тривимірна геометрія побудована в реальному масштабі (довжина 80 мм та висота 5...25 мм);
- розрахункова сітка має трикутникові сегменти площею  $S = 30 \times 10^{-8} \text{ м}^2$ ;
- параметри середовища — нормальні умови;
- густина газу  $\rho_f = 1,225 \text{ кг/м}^3$ ;
- в'язкість  $\mu_f = 1,79 \times 10^{-5} \text{ кг/(м} \times \text{с)}$ ;
- матеріал стінки каналу — алюміній з шерохова-тістю 0,1 мм та густина  $\rho_{\text{ал}} = 2690 \text{ кг/м}^3$ ;
- мінімальний діаметр частинок — 3 мкм;
- середній діаметр частинок — 100 мкм;
- максимальний діаметр частинок — 150 мкм;
- концентрація рідкої фази ( $\text{H}_2\text{O}$ ) — 5, 10, 15, 20%;
- діапазон швидкостей — 5, 10, 15, 20 м/с.

На рис. 3–10 представлено розподіл швидкості, кінетичної енергії тубулентності, статичного й динамічного тиску для радіусу каналу — 5; 10; 15; 20; 25 мм при  $U = 5...20 \text{ м/с}$ . Установлено, що найбільш ефективні гідродинамічні характеристики має канал довжиною 80 мм з радіусом 15 мм.

Здійснено розрахунок осадження (таблиця 1) в сепаруючому профілі за діаметра частинок 1...3 мкм, концентрації рідкої фази ( $\text{H}_2\text{O}$ ) — 5, 10, 15, 20% і діапазоні швидкостей — 5, 10, 15, 20 м/с. Для отримання рішення розв'язано задачі в нестационарних умовах з фінальним кроком у часі для досягнення траєкторії руху частинок методом Raising Rambler поверхонь осадження — стінок профіля або площі виходу у розрахунковій сітці. Під час розрахунку брали до уваги, що у випадку збігання траєкторії руху частинок, вони об'єднуються, й частинка вважається вловленою в разі, якщо її траєкторія руху збігається зі стінкою каналу.

При швидкостях 5...10 м/с коефіцієнт осадження для профіля з радіусом 5 мм складає 36,1...30,2%. За умови збільшення швидкості потоку до 20 м/с спостерігається зрив рідкої фази й коефіцієнт осадження падає до 20,8%. При швидкостях до 5...10 м/с коефіцієнт осадження для профіля з радіусом 10 мм дорівнює 91,9...90,4%. У разі збільшення швидкості потоку до 20 м/с простежується зрив рідкої фази й коефіцієнт осадження зменшується до 51,9%. При швидкостях до 5...10 м/с коефіцієнт осадження для профіля з радіусом 15 мм складає 99,9...99,1%. За умови збільшення швидкості потоку до 20 м/с спостерігається зрив рідкої фази й коефіцієнт осадження падає до 74,9%. При швидкостях до 5...10 м/с коефіцієнт осадження для профіля з радіусом 20 мм дорівнює 85,6...72,9%. У разі збільшення швидкості потоку до 20 м/с відбувається зрив рідкої фази й коефіцієнт

осадження зменшується до 50,5%. При швидкостях до 5...10 м/с коефіцієнт осадження для профіля з радіусом 25 мм складає 42,5...31,3%. У разі збільшення швидкості потоку до 20 м/с спостерігається зрив рідкої фази й коефіцієнт осадження знижується до 15,9%.

У результаті розрахунку встановлено, що найбільш ефективним каналом осадження є канал з радіусом 15 мм й найбільш ефективний діапазон швидкостей 1...10 м/с.

У процесі дослідження найбільш ефективного радіусу сепаруючого профілю й визначення робочих швидкостей у каналі розроблено загальну схему суднових систем очищення повітря від краплинної вологи й створено тривимірну модель сепаратора 1000×500×116 мм (рис. 11–12). На її основі подано розрахункову сітку з такими параметрами:

- тривимірна геометрія побудована у реальному масштабі — 1000×500×116 мм
- розрахункова сітка складається з трикутникових сегментів площею  $S = 30 \times 10^{-8} \text{ м}^2$ ;
- параметри середовища — нормальні умови;
- густина газу  $\rho_f = 1,225 \text{ кг/м}^3$ ;
- в'язкість  $\mu_f = 1,79 \times 10^{-5} \text{ кг/(м} \times \text{с)}$ ;
- матеріал стінки каналу — алюміній з шерохова-тістю 0,1 мм й густиною  $\rho_{\text{ал}} = 2690 \text{ кг/м}^3$ ;
- мінімальний діаметр частинок  $d_{\text{min}}$  — 3 мкм;
- середній діаметр частинок  $d_{\text{mid}}$  — 100 мкм;
- максимальний діаметр частинок  $d_{\text{max}}$  — 150 мкм;
- концентрація рідкої фази ( $\text{H}_2\text{O}$ ) — 5, 10, 15, 20%;
- діапазон швидкостей — 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 м/с.

Процеси в суднових системах очищення повітря від краплинної вологи підпорядковані двом головним завданням: осадженню краплин на поверхні сепаруючих профілів і відводу вловленої води в збірник-піддон без пошкодження плівки води, що утворилася, тобто без вторинного обводнення потоку. У криволінійному каналі краплини води, що транспортуються повітряним потоком під дією інерційних сил, осаджуються як на випуклій (лобовій), так і на вигнутій частині каналу.

У суднових кондиціонерах швидкість повітря на вході знаходиться у межах 2...10 м/с, концентрація краплинної вологи досягає 30 г/кг, середній ваговий діаметр краплин при розпорощенні води механічними форсунками дорівнює 100–150 мкм, при зриві плівки з крайок — 200 мкм.

У результаті експериментальних досліджень на дослідному стенді у вигляді аеродинамічної труби відкритого типу процесів осадження краплинної вологи за початкової швидкості в каналі  $U = 1...10 \text{ м/с}$  встановлено максимальну концентрацію рідкої фази для сепаруючого профілю (табл. 2–3).

Таблиця 1. Розрахунок коефіцієнта осадження в сепаруючому профілі

R (мм)	U = 5 м/с				U = 10 м/с				U = 15 м/с				U = 20 м/с			
	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%
5	35,7	34,7	35,8	36,1	31,3	31,2	31,4	30,2	25,9	24,8	25,7	26,4	20,8	20,6	20,4	20,2
10	91,6	91,4	91,3	91,9	94,8	92,8	91,3	90,4	70,9	69,4	68,2	68,3	51,9	50,3	50,5	49,4
15	99,9	99,9	99,9	99,9	99,6	99,3	99,4	99,1	82,3	82,4	83,5	84,9	74,9	73,5	74,1	73,8
20	84,3	85,1	85,6	85,5	82,0	78,9	74,4	72,9	61,3	61,6	60,8	60,3	50,5	50,4	49,7	48,4
25	42,5	42,1	41,9	41,2	32,0	32,5	31,3	31,4	22,7	22,4	21,8	21,4	15,4	15,1	15,9	14,6

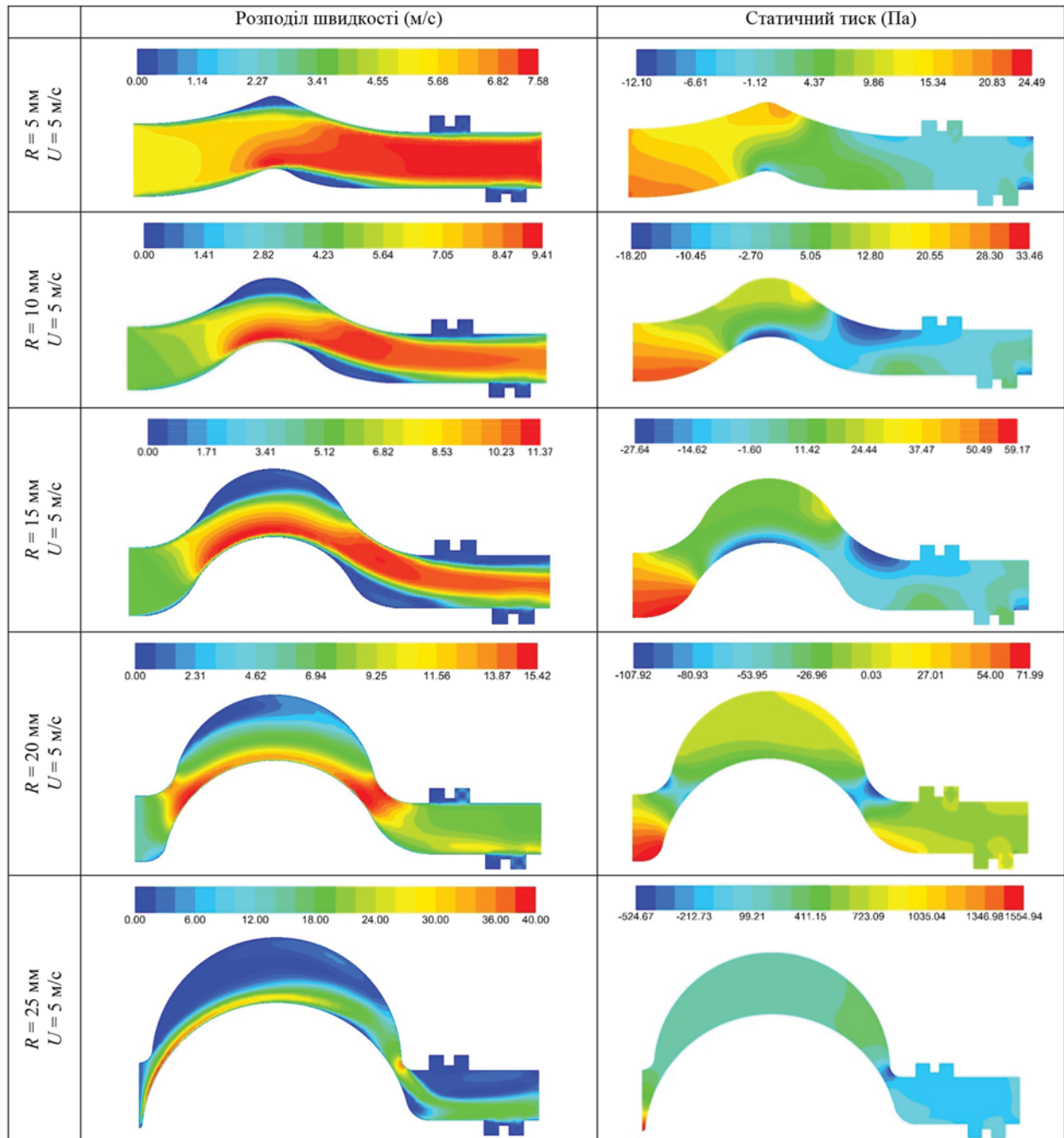


Рис. 3. Розрахунок розподілу швидкості й статичного тиску для радіуса каналу 5, 10, 15, 20, 25 мм при U = 5 м/с

Таблиця 2. Результати розрахункових досліджень коефіцієнта осадження для сепаратора 1000 × 500 × 116 мм

U, м/с	Концентрація рідкої фази в потоці											
	5%			10%			15%			20%		
	(d <sub>min</sub> )	(d <sub>mid</sub> )	(d <sub>max</sub> )	(d <sub>min</sub> )	(d <sub>mid</sub> )	(d <sub>max</sub> )	(d <sub>min</sub> )	(d <sub>mid</sub> )	(d <sub>max</sub> )	(d <sub>min</sub> )	(d <sub>mid</sub> )	(d <sub>max</sub> )
1	90,1	99,9	100	85,9	99,9	100	83,9	99,9	100	82,8	99,9	100
2	90,3	99,9	100	85,6	99,9	100	83,6	99,9	100	82,2	99,9	100
3	90,6	99,9	100	85,2	99,9	100	83,3	99,9	100	81,9	99,9	100
4	90,0	99,9	100	85,4	99,9	100	83,2	99,9	100	81,6	99,9	100
5	90,4	99,9	100	85,1	99,9	100	83,1	99,9	100	81,2	99,9	100
6	90,1	99,9	100	84,5	99,9	100	82,7	99,9	100	80,8	99,9	100
7	90,2	99,9	100	84,1	99,9	100	82,3	99,9	100	80,4	99,9	100
8	89,9	99,9	100	83,9	99,9	100	81,9	99,9	100	80,2	99,9	100
9	89,4	99,9	100	83,6	99,9	100	81,5	99,9	100	79,8	99,9	100
10	89,1	99,9	100	83,1	99,9	100	81,1	99,9	100	79,1	99,9	100

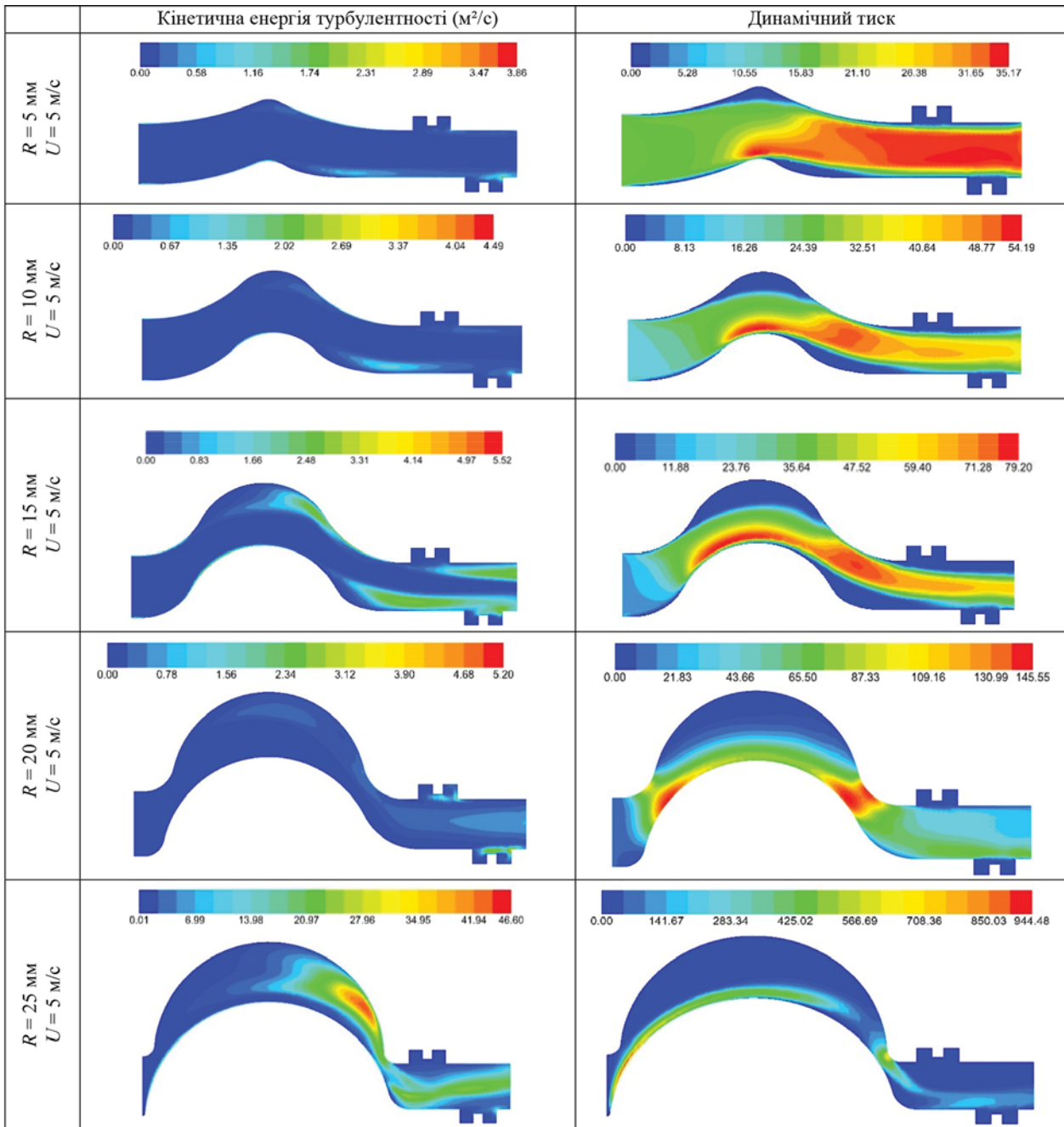


Рис. 4. Розрахунок розподілу кінетичної енергії турбулентності й динамічного тиску для радіуса каналу 5, 10, 15, 20, 25 мм при U = 5 м/с

Таблиця 3. Результати експериментальних досліджень коефіцієнта осадження для сепаратора 1000 × 500 × 116 мм

U, м/с	Концентрація рідкої фази у потоці															
	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%
1	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	94,9	91,4	90,6	81,1	79,2	75,0	71,9	67,8	61,7	55,4	53,1
2	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	94,1	91,9	91,3	81,8	78,4	75,1	71,2	66,4	62,9	55,4	51,9
3	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	95,9	91,0	91,6	81,9	79,3	74,8	70,9	67,7	63,8	54,2	50,4
4	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	95,4	91,1	91,2	81,3	78,9	74,1	69,0	68,5	62,3	55,2	51,1
5	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	95,1	91,9	90,2	80,3	79,6	73,0	68,8	69,4	61,3	54,2	51,9
6	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	90,1	84,8	89,9	78,9	71,9	68,9	61,9	63,2	54,1	49,9	45,9
7	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	82,9	82,5	82,2	74,1	69,2	62,1	57,1	53,9	49,4	44,1	39,9
8	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	80,3	79,3	74,9	70,7	64,3	57,8	52,0	47,3	41,6	37,8	32,9
9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	78,2	77,1	71,2	66,4	59,9	51,2	45,7	41,2	36,7	32,5	26,9
10	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	83,9	75,9	69,9	61,9	54,9	46,9	41,8	35,9	31,9	28,2	24,9

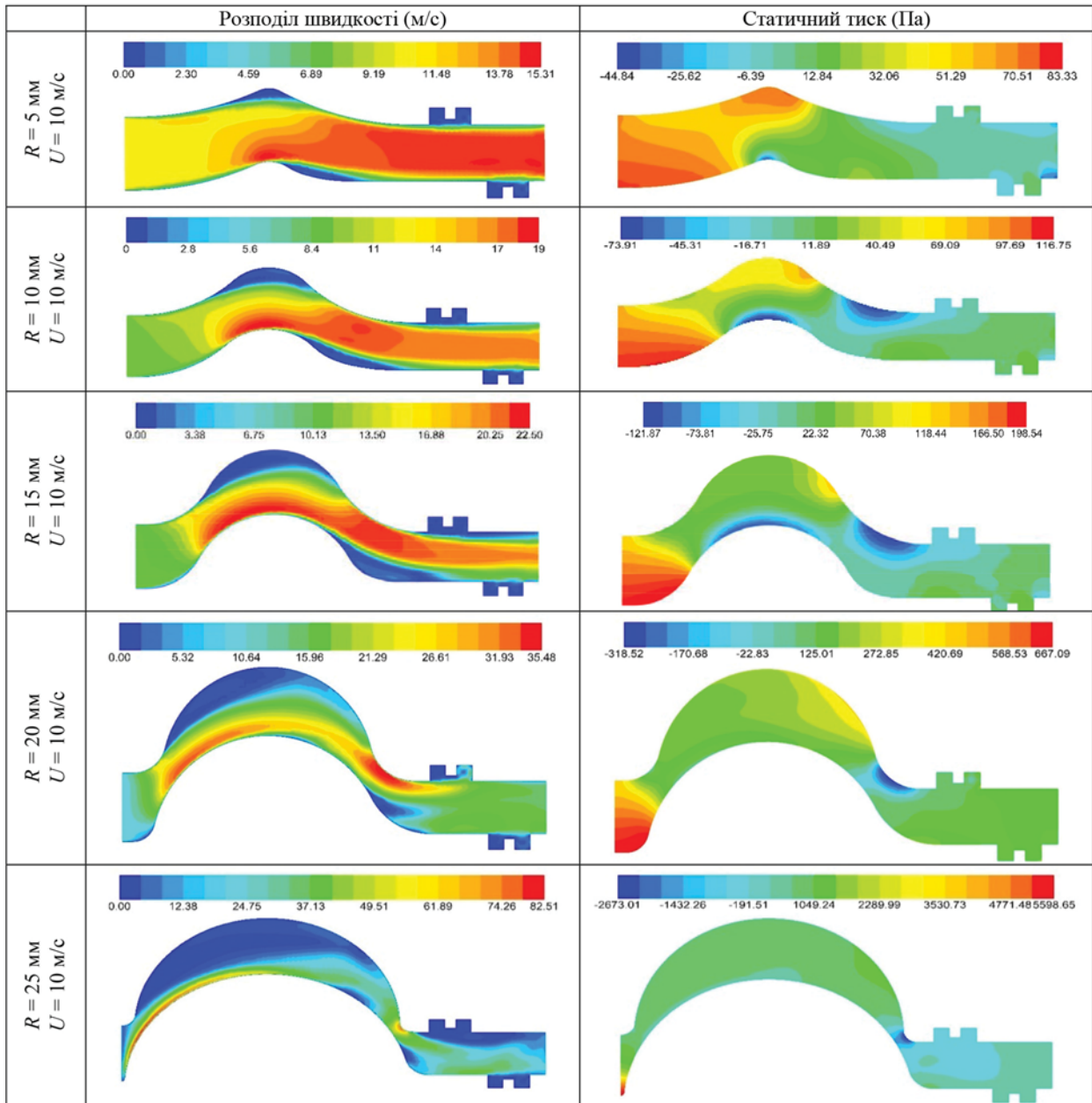


Рис. 5. Розрахунок розподілу швидкості й статичного тиску для радіуса каналу 5, 10, 15, 20, 25 мм при  $U = 10$  м/с



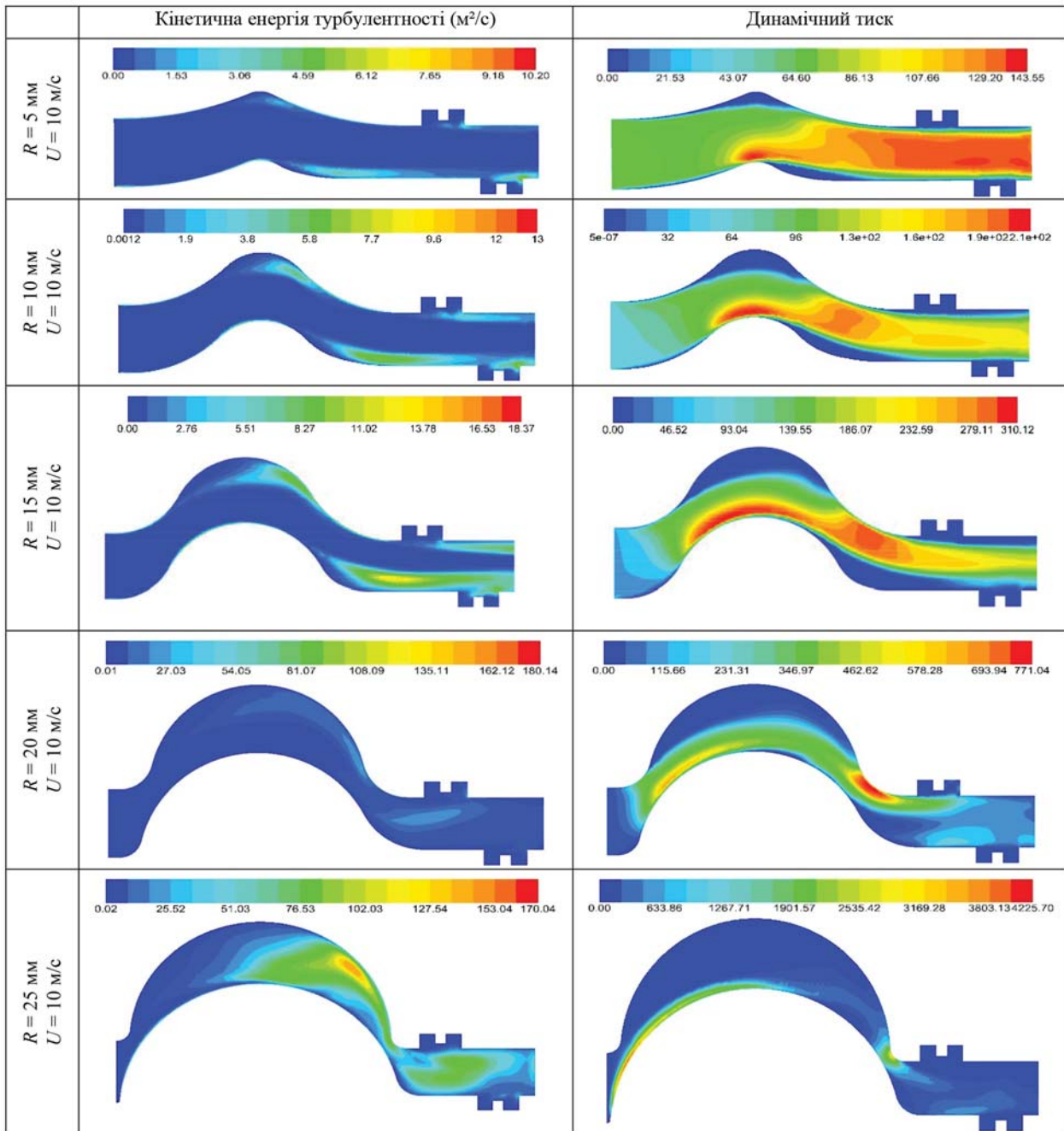


Рис. 6. Розрахунок розподілу кінетичної енергії турбулентності й динамічного тиску для радіуса каналу 5, 10, 15, 20, 25 мм при  $U = 10 \text{ м/с}$

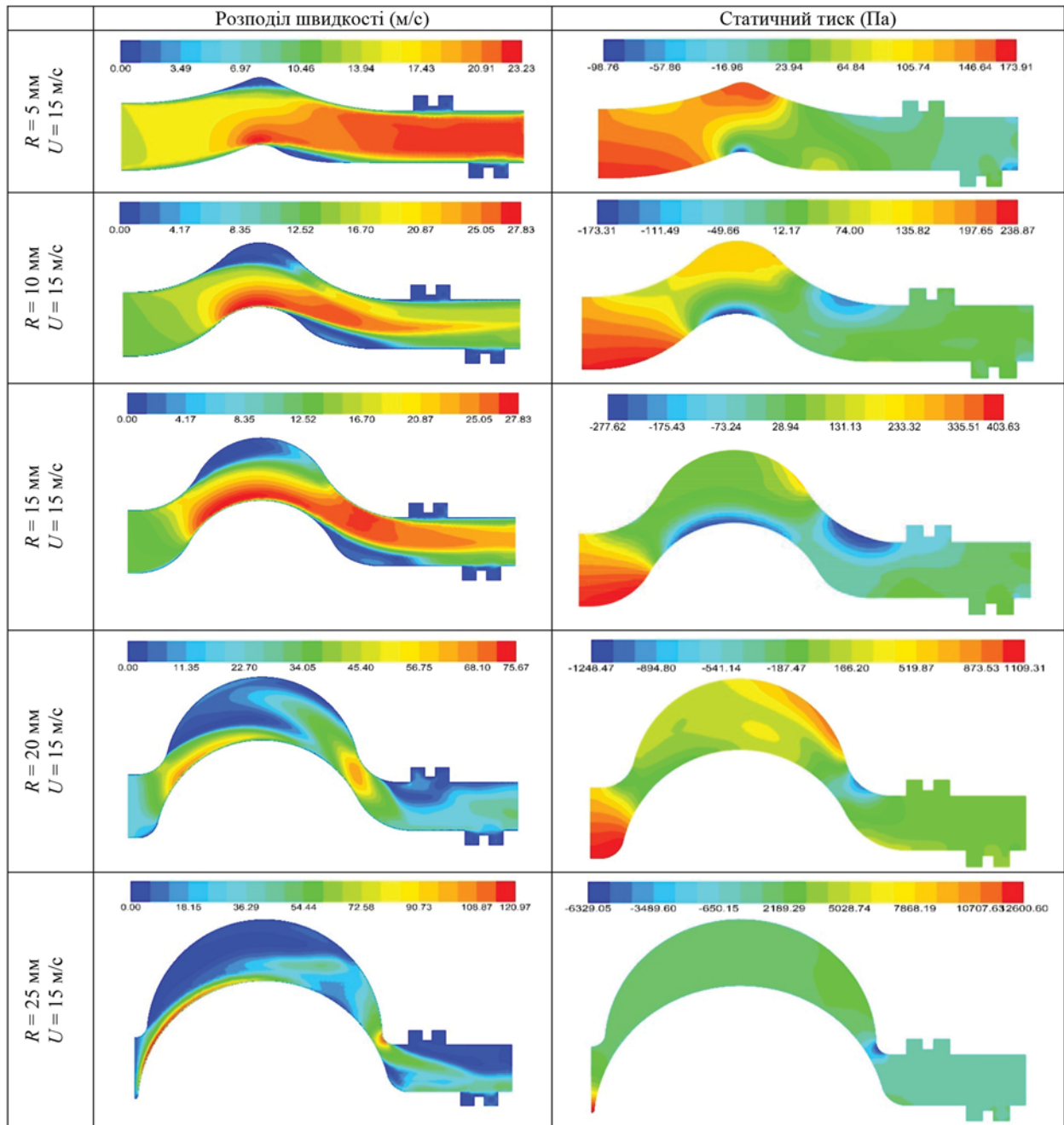


Рис. 7. Розрахунок розподілу швидкості й статичного тиску для радіуса каналу 5, 10, 15, 20, 25 при мм  $U = 15 \text{ m/c}$

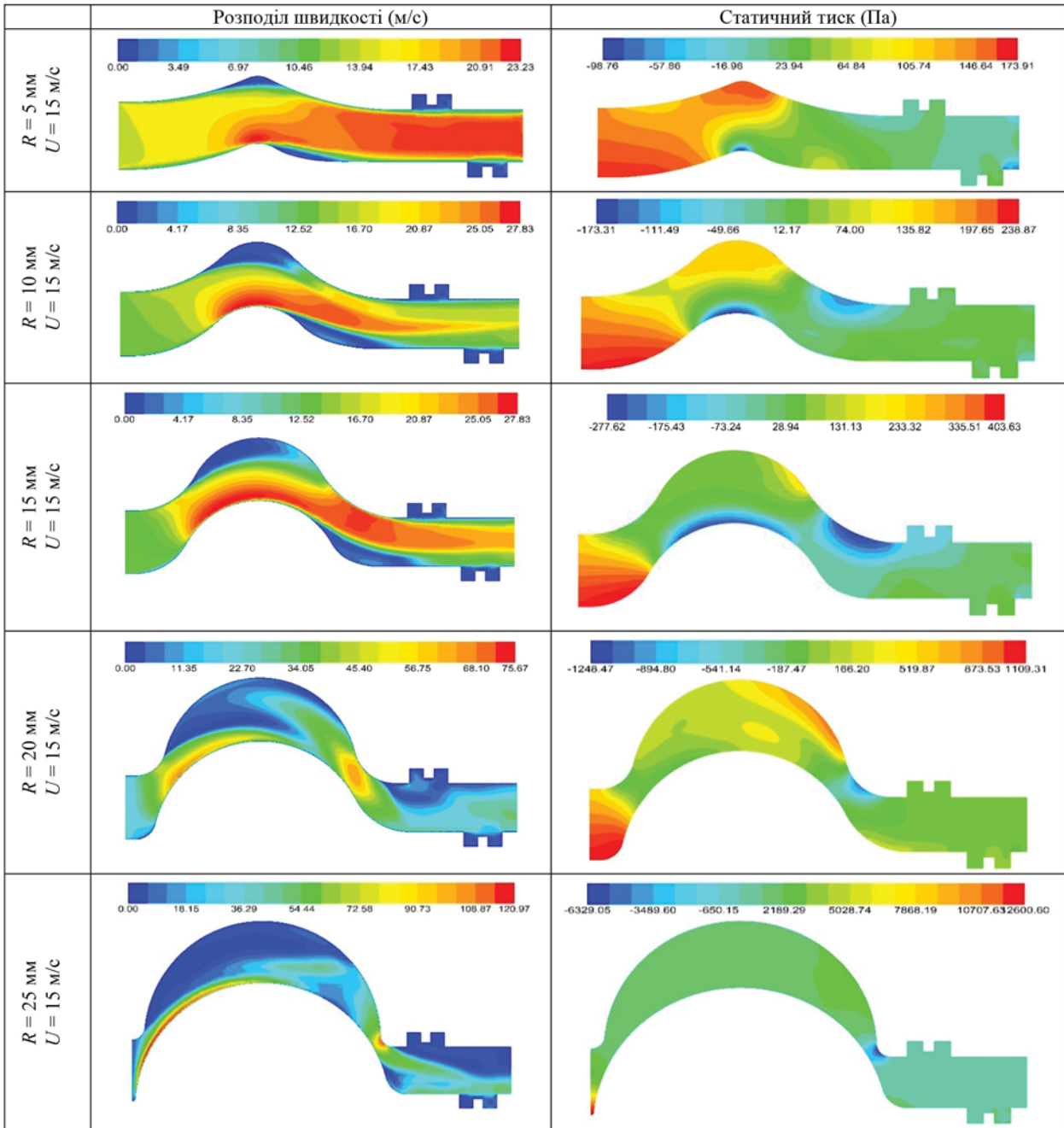


Рис. 8. Розрахунок розподілу кінетичної енергії турбулентності й динамічного тиску для радіуса каналу 5, 10, 15, 20, 25 мм при  $U = 15 \text{ м/с}$

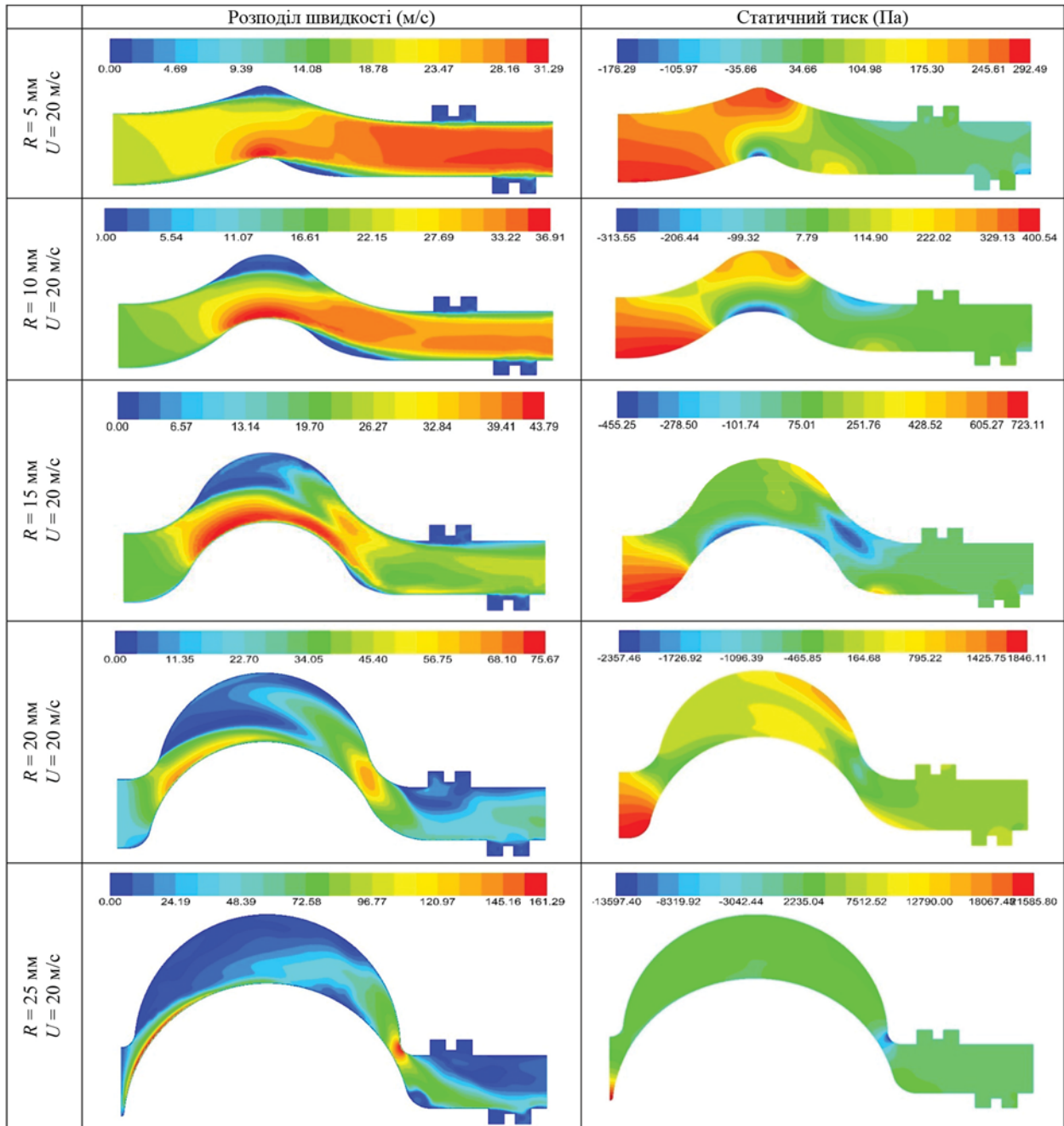


Рис. 9. Розрахунок розподілу швидкості й статичного тиску для радіуса каналу 5, 10, 15, 20, 25 мм при  $U = 20 \text{ м/с}$

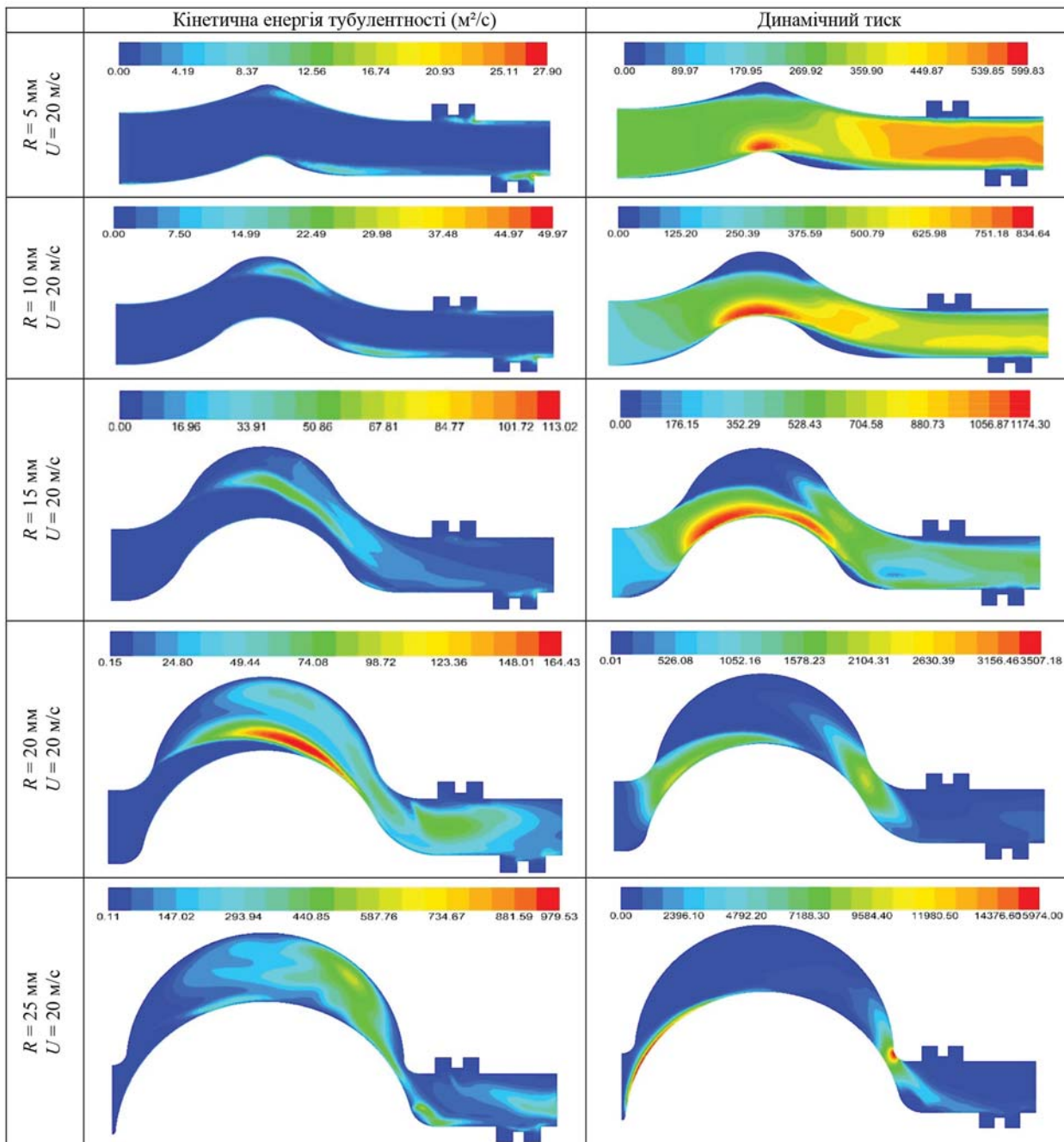
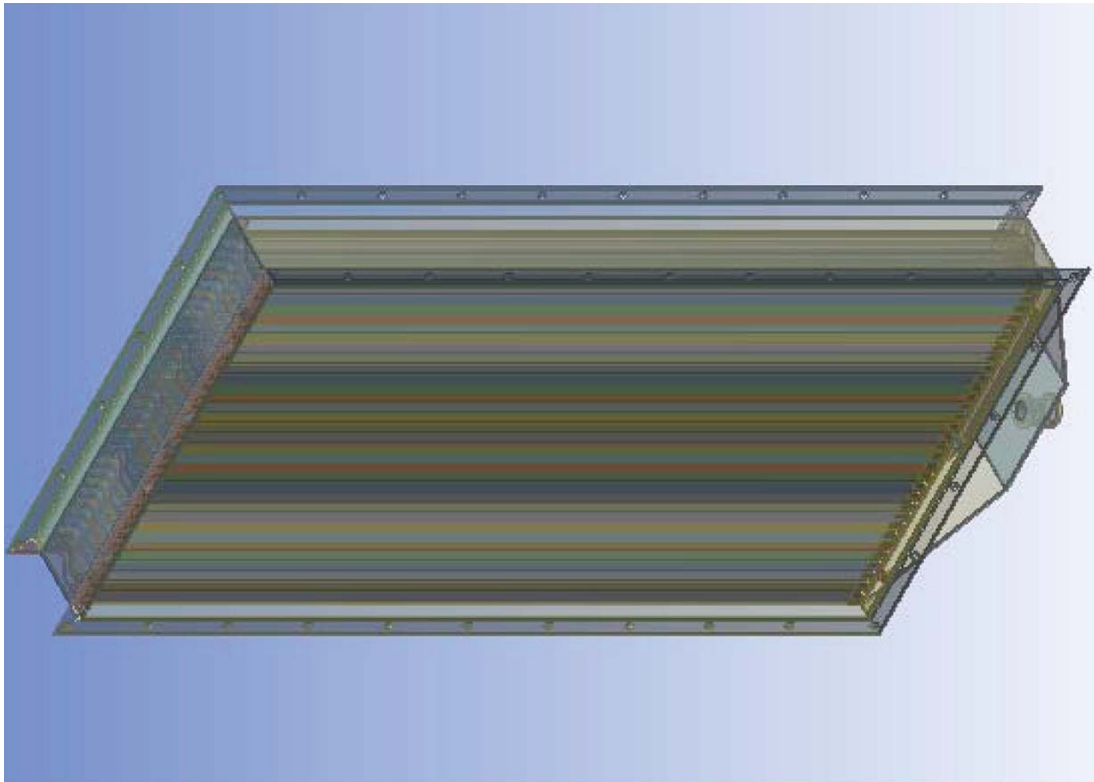
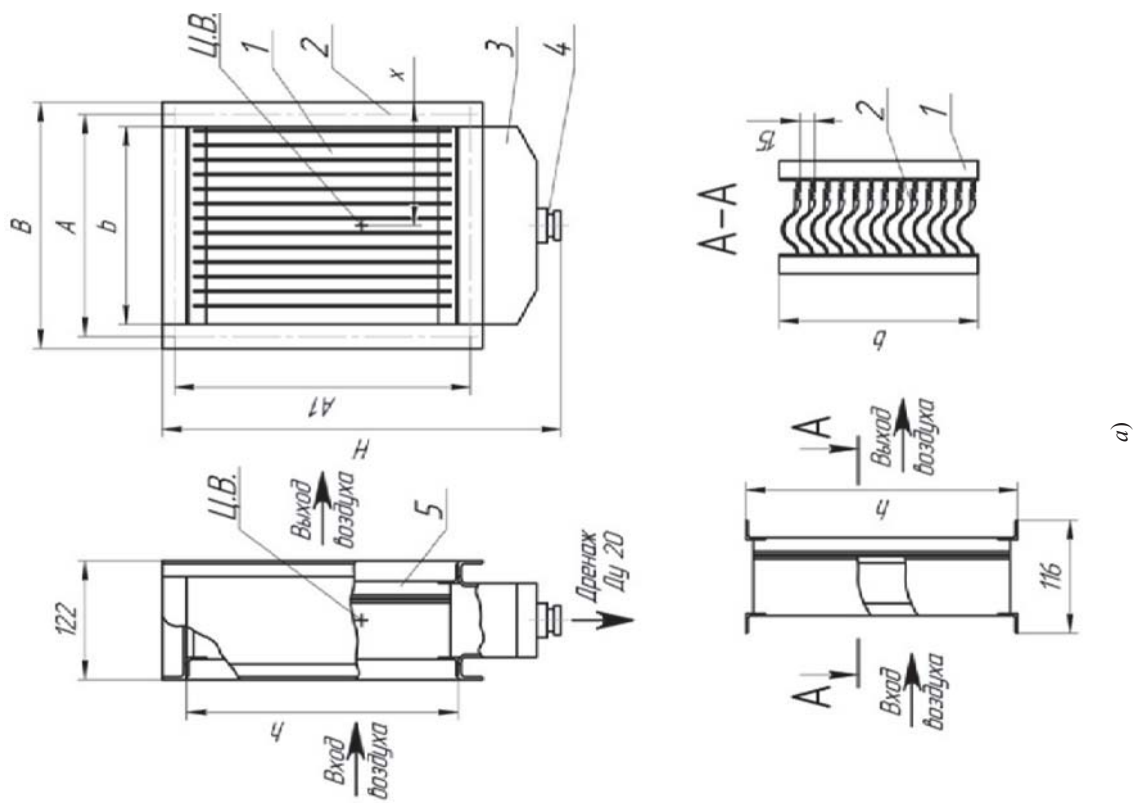


Рис. 10. Розрахунок розподілу кінетичної енергії турбулентності й динамічного тиску для радіуса каналу 5, 10, 15, 20, 25 мм при  $U = 20 \text{ м/с}$



б)



а)

**Рис. 11.** Загальна схема суднових систем очищення повітря від краплинної вологи (а), тривимірна модель сепаратора 1000 × 500 × 116 мм (б):

1 — сепаруючий профіль; 2 — фланець кріплення; 3 — піддон зливу; 4 — зливний патрубок; 5 — кріплення сепаруючого модуля; А, В, А1, Н, b, h — розміри обладнання

ЗАГАЛЬНА ТРИВИМІРНА МОДЕЛЬ 1000 × 500 × 116 ММ

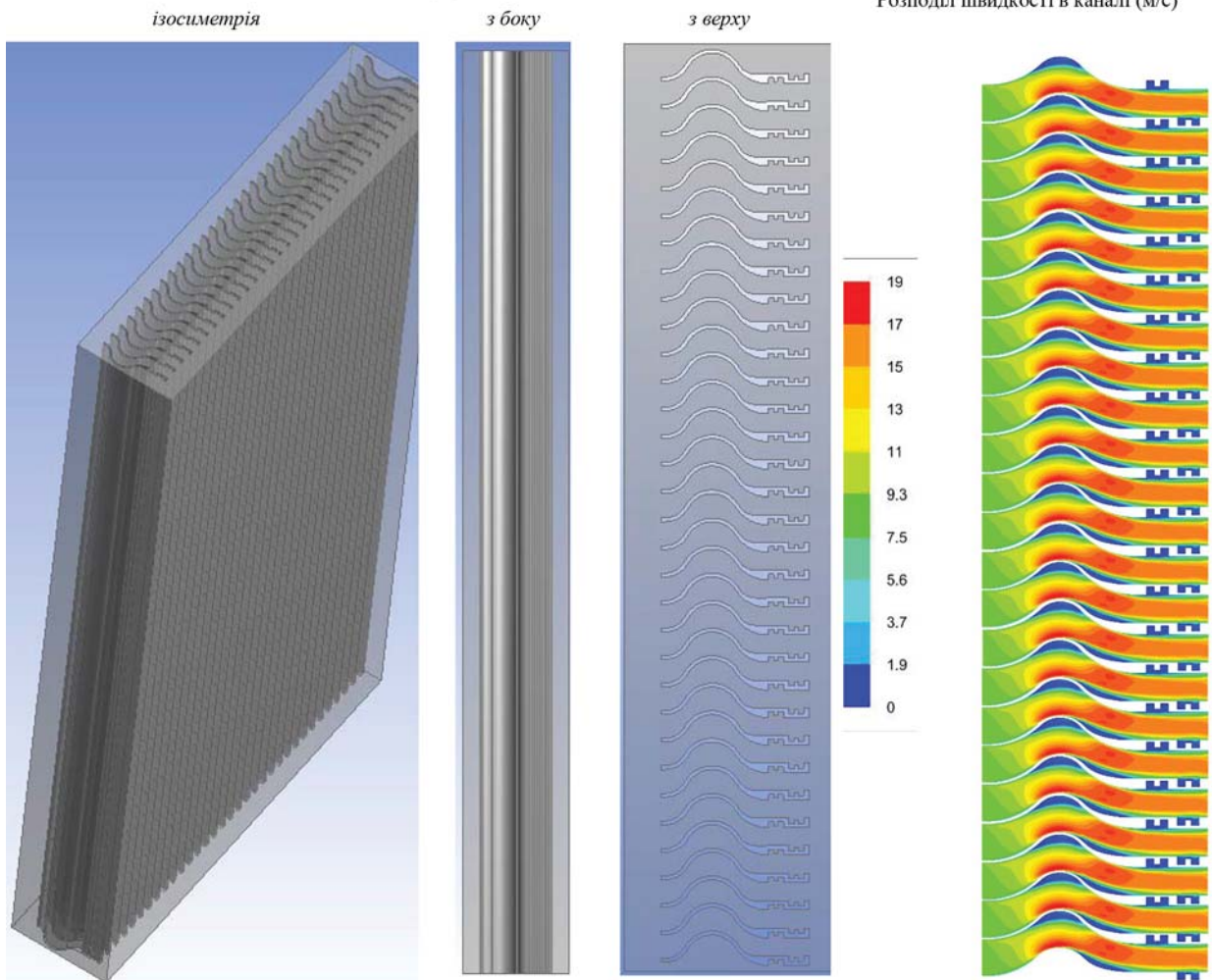


Рис. 12. Розрахункова сітка й розрахунок швидкості для моделі сепаратора 1000 × 500 × 116 мм

Дисперсна повітряно-водяна суміш готувалася в камері змішувача за допомогою механічних і пневматичних форсунок. Дисперсність визначалася методом дотику, тобто шляхом нанесення крапель на дзеркальні пластини з подальшим фотографуванням. Сепаруюча здатність визначалася трьома способами: матеріальним балансом, методами дотику і фільтрації за допомогою аналітичних фільтрів Петрянова.

Проведений аналіз показав, що в сепараційних каналах краплі осаджуються на випуклій і вигнутій частині профілю в порівнювальних кількостях. Внаслідок цього, на сепаруючих профілях для запобігання вторинного обводнення потоку необхідно встановлювати двобічні водовідвідні елементи. Характерною особливістю розроблених сепаруючих профілів є поєднання хвилеподібної частини з плоскими вхідними й вихідними ділянками. У зборі сепаруючі профілі утворюють криволінійні канали з низкою послідовних конфузюрних і дифузюрних ділянок.

У дифузюрних ділянках виникають відривні зони із зворотною течією газу. Плівка рідини, яка виникає внаслідок осадження крапель, потрапляючи в ці зони, схильна до впливу вихорів, які протидіють руху плівки в напрямку основного потоку і сприяють її стоку під дією сили тяжіння.

Вихрові зони забезпечують повне відведення вловленої води з поверхні гладкого профілю до певної швидкості — 5 м/с. Перевищення цієї швидкості, призводить до виносу частини води з вихрових зон. Для запобігання вторинного обводнення потоку на плоских ділянках сепаруючого профілю, передбачені водовідвідні елементи.

У системах кондиціонування з поверхневими теплообмінниками головним джерелом краплинної вологи є повітроохолоджувачі. Конденсатна плівка зривається повітряним потоком з кромки теплообмінної поверхні, утворюючи краплини. У системах з контактними апаратами оброблюване повітря насичується краплинами води у форсуночкових каме-

Таблиця 4. Класифікація віддільників води

Типи віддільників води	Загальне призначення
ВВМ	Віддільники магістральні для відокремлення води від повітря в системах кондиціонування і вентиляції
ВВМ1	Віддільники магістральні для відокремлення води від повітря в системах машинної вентиляції
ВВК	Віддільники центральних кондиціонерів для відокремлення води від повітря в системах кондиціонування

Таблиця 5. Перелік віддільників води за об'ємною витратою

Умовне позначення	Об'ємна витрата повітря, м <sup>3</sup> /год	Аеродинамічний опір, ПА (мм.вод.ст.)	Робоче навантаження вологи, г/кг сухого повітря	Відокремлююча властивість, % (граничне відхилення –1,0)
ВВМ 6,3	630–1600	40–250	20	100
ВВМ 10,0	1000–2500	55–315		
ВВМ 16,0	1600–4000	40–250		
ВВМ 25,0	2500–6300	40–250		
ВВМ 40,0	4000–10000	45–315		
ВВМ 63,0	6300–16000	40–250		
ВВМ1 100,0	10000–16000	60–155		
ВВМ1 160	16000–25000	65–150		
ВВМ1 250,0	25000–40000	92–235		
ВВМ1 400,0	30000–40000	100–160		
ВВК 16,0	1600–4000	20–100		
ВВК 25,0	2500–6300	25–125		
ВВК 40,0	4000–10000	20–100		
ВВК 63,0	6300–16000	20–155		

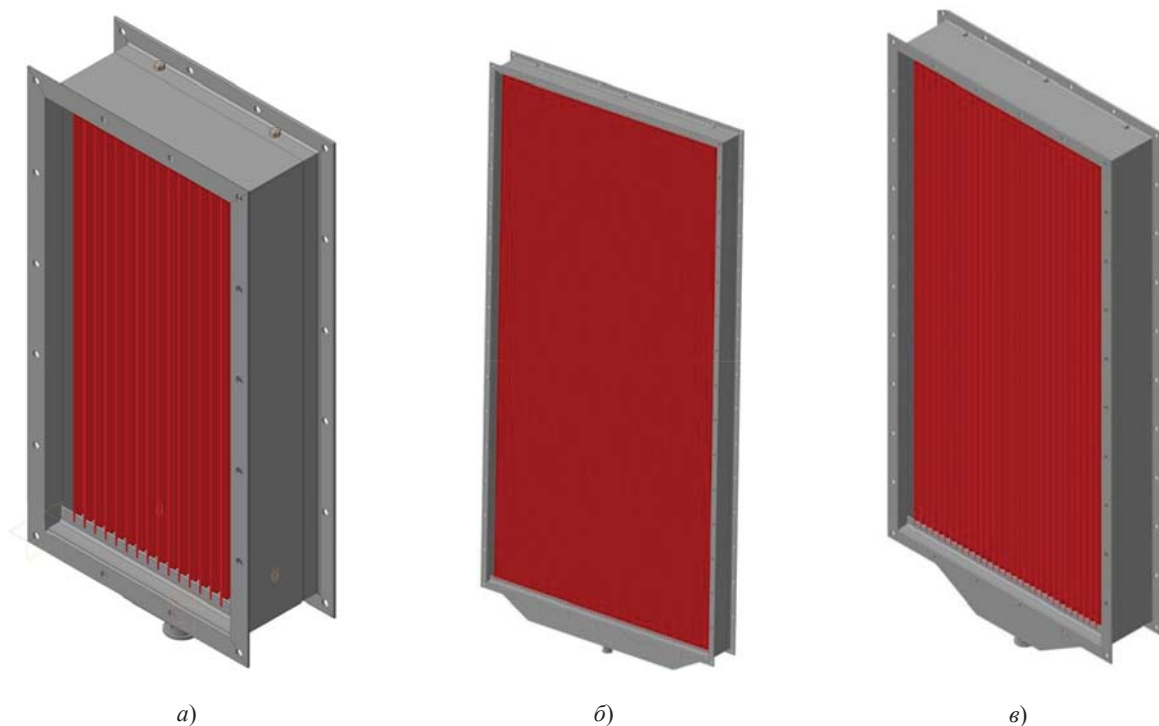


Рис. 13. Тривимірний вид конструкції суднової системи очищення повітря від краплинної вологи:

*a* — 500 × 250 × 116 мм, *б* — 1000 × 500 × 116 мм, *в* — 2000 × 1000 × 116 мм



рах, плівкових апаратах та ін. Розміри крапель залежать від розпилу, умов відриву частинок води від поверхні, а також характеру взаємодії частинок, які відірвалися, з повітряним потоком. Під впливом аеродинамічних сил великі краплини можуть подрібнюватися. Теоретичні й експериментальні дослідження показують, що розпад крапель під дією аеродинамічних сил визначається числом Вебера. Коли число Вебера більше 14, то всі краплини подрібнюються, причому краплини, які утворюються, тим менші, чим більше число Вебера.

На основі виконаних теоретичних й експериментальних досліджень розроблено й затверджено креслення для модельного ряду суднових систем очищення повітря від краплинної вологи й підготовлено й затверджено стандарт підприємства для модельного ряду суднових систем очищення повітря від краплинної вологи (таблиця 4–5).

На рис. 13 показано типову конструкцію суднової системи очищення повітря від краплинної вологи з однорядним пакетом сепаруючих профілів з параметрами  $500 \times 250 \times 116$  мм;  $1000 \times 500 \times 116$  мм;  $2000 \times 1000 \times 116$  мм, для яких розроблено конструкторську документацію й створено робочі зразки обладнання.

Випробування цих водовіддільників показали, що коефіцієнт уловлювання за водності до 50 г/кг і швидкості повітря на вході до 10 м/сек практично дорівню-

вав 100%. Результати дослідження аеродинамічного опору свідчать, що аеродинамічний опір за швидкості 5 м/сек складає  $50 \text{ Н/м}^2$ .

**ВИСНОВКИ.** 1. Здійснено математичне моделювання процесів за початкової швидкості 5, 10, 15, 20 м/с на основі сепараційних градієнтних аерозольних технологій у різних швидкостях потоку в сепаруючих профілях з радіусами 5, 10, 15, 20, 25 мм.

2. Розраховано розподіл швидкості, статичного тиску, динамічного тиску, кінетичної енергії турбулентності й коефіцієнтів осадження на основі сепараційних градієнтних аерозольних технологій для швидкостей потоку 5, 10, 15, 20 м/с в сепаруючих профілях з радіусами 5, 10, 15, 20, 25 мм. Обчислено коефіцієнт осадження краплинної вологи для швидкостей потоку 5, 10, 15, 20 м/с в сепаруючих профілях з радіусами 5, 10, 15, 20, 25 мм.

3. Запропоновано конструктивні рішення суднових систем очищення повітря від краплинної вологи для витрат повітря від 20 до 2000 м<sup>3</sup>/год.

4. Розроблено креслення для модельного ряду суднових систем очищення повітря від краплинної вологи.

5. Підготовлено стандарт підприємства для модельного ряду суднових систем очищення повітря від краплинної вологи.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Белоусов В. В. Теоретические основы процессов газоочистки [Текст] / В. В. Белоусов. — М. : Metallurgiya, 1988. — 256 с.
- [2] Рыжков С. С. Экологические ресурсосберегающие технологии для промышленной теплотехники на основе дисперсных двухфазных сред [Текст] / С. С. Рыжков, Б. И. Басок // Промышленная теплотехника. — 2001. — № 4–5. — С. 141–145.
- [3] Ван-Дайка М. Течение жидкости и газа [Текст] / М. Ван-Дайка. — М. : Мир, 1986. — 114 с.
- [4] Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию [Текст] / П. Райст. — М. : Мир, 1987. — С. 34–40.
- [5] Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей [Текст] / Е. П. Медников. — М. : Наука, 1981. — 176 с.
- [6] Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справочник Ч. 1 [Текст] / под ред. С. Калверта и Г.М. Инглунда. — М. : Metallurgiya, 1988. — 760 с.
- [7] Рыжков С. С. Методи очищення повітряного середовища від забруднень [Текст] / С. С. Рыжков, Ю. М. Харитонов, В. В. Благодатний. — Миколаїв : УДМТУ. — 2002. — 56 с.

© С. С. Рыжков

Надійшла до редколегії 02.02.2017  
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. М. І. Радченко

# ВІСНИК

## НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ



Згідно з бюлетенем ВАК України № 12 від 2009 року (с. 5); № 5 від 2010 року (с. 15); № 6 від 2010 року (с. 13) електронне видання «Вісник НУК» внесене до переліку електронних наукових фахових видань.

Видання виходить до 6 разів на рік в електронному вигляді та 1 раз на рік — у друкованому.

Матеріали, опубліковані у «Віснику НУК», зараховуються як фахові у галузях технічних та економічних наук.

Видання містить статті з результатами досліджень за групами спеціальностей: кораблебудування; обробка матеріалів у машинобудуванні; галузеве машинобудування; електротехніка; інформатика; обчислювальна техніка та автоматизація; техногенна безпека; енергетика; машинобудування; економіка та управління підприємствами.

<http://ev.nuos.edu.ua>

### Для подання статті необхідні:

- експертний висновок про можливість опублікування;
- протокол засідання експертної комісії;
- витяг із протоколу засідання кафедри;
- рецензія на статтю;
- відомості про авторів (анкета автора);
- 2 примірники роздрукованої статті на папері формату А4;
- електронний варіант статті.

### Статті приймаються за адресою:

каб. 459, просп. Героїв України, 9,  
м. Миколаїв, 54025

тел.: (+380512) 42-32-71

e-mail: [ev@nuos.edu.ua](mailto:ev@nuos.edu.ua)

### Контактна особа:

Серопян Роза Рубенівна

Мова збірника: українська, російська,  
англійська