

DOI 10.15589/jnn20170207  
УДК 629.12.03  
Р93

**THREE-DIMENSIONAL MODELING OF THE SEPARATION  
GRADIENT AEROSOL TECHNOLOGIES. OIL SEPARATORS OF THE  
GTE SUCTION SYSTEMS WITH THE GAS FLOW RATE UP TO 800 m<sup>3</sup>/h**

**ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕПАРАЦИОННЫХ  
ГРАДИЕНТНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. МАСЛОУДЕЛИТЕЛИ  
СИСТЕМ СУФЛИРОВАНИЯ ГТД С РАСХОДОМ ГАЗА ДО 800 м<sup>3</sup>/ч**

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

**С. С. РЫЖКОВ,**  
канд. техн. наук

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

**Abstract.** There have been implemented separation gradient aerosol technologies which take into account all the forces and effects that influence the deposition of finely dispersed particles. Substantiation is provided for the scientific statement of intensification of the gradient processes of the aerosol media transfer in the boundary layers of multipurpose surfaces during cleaning of the dispersed multiphase flows for the development of technical devices enhancing energy saving and ecological purity of power plants. A sectional design scheme and a three-dimensional model of an oil separator in finite elements were developed for calculating the hydrodynamics and separation. The hydrodynamic situation and the trajectory of the particles in the flow section of the oil separator are calculated. According to the calculation of the velocity distribution in the oil separator at  $G = 100...200$  m<sup>3</sup>/h, the velocity in the coagulation profile does not exceed 10 m/s. On the basis of the results of the static pressure distribution for  $G = 100, 200$  m<sup>3</sup>/h, it is established that the pressure difference in the separating coagulators reaches 2.5...3.9 kPa, respectively. The calculation results at  $G = 100...200$  m<sup>3</sup>/h show that the total pulsation effect of precipitation of the highly dispersed particles makes up 25.1%. Using the calculations, a prototype oil separator was created; its experimental studies were performed on the stand in the form of an open-type wind tunnel. The coefficient of the total purification efficiency is determined, which reaches 99.9%. On the basis of the separation gradient aerosol technologies, it is possible to improve cleaners capturing aerosols in various power plant systems. The performed studies allow further developing a line-up of separators for the gas flow rate from 20 to 2000 m<sup>3</sup>/h.

**Keywords:** oil separator; gradient aerosol technologies; three-dimensional design grid; static pressure; coefficient of total efficiency.

**Аннотация.** Применено трехмерное моделирование сепарационных градиентных аэрозольных технологий. Созданы трёхмерные модели для численного эксперимента усовершенствованного маслоотделителя для систем суфлирования газотурбинных двигателей с контактными уплотнениями. Выполнены исследования в диапазоне расходов 400...800 м<sup>3</sup>/ч. На основе расчетов создан опытный образец маслоотделителя и выполнены его экспериментальные исследования на специальном стенде. Определен коэффициент суммарной эффективности очистки, который достигает 99,9% для  $G = 400-800$  м<sup>3</sup>/час.

**Ключевые слова:** маслоотделитель; градиентные аэрозольные технологии; трехмерная расчетная сетка; статическое давление; коэффициент суммарной эффективности.

**Анотація.** Застосовано тривимірне моделювання сепараційних градієнтних аерозольних технологій. Створено тривимірні моделі для чисельного експерименту вдосконаленого масловіддільника для систем суфлювання газотурбінних двигунів з контактними ущільненнями. Виконано дослідження в діапазоні витрат 400, 600, 800 м<sup>3</sup>/год. На основі розрахунків створено дослідний зразок масловіддільника й виконано його експериментальне вивчення на спеціальному стенді. Визначено коефіцієнт сумарної ефективності очищення, який досягає 99,9% для  $G = 400-800$  м<sup>3</sup>/год.

**Ключові слова:** масловіддільник; градієнтні аерозольні технології; тривимірні розрахункова сітка; статичний тиск; коефіцієнт сумарної ефективності.

## REFERENCES

- [1] Yong Wang, Qingyuan Yang, Chongli Zhong, Jinping Li. Theoretical investigation of gas separation in functionalized nanoporous graphene membranes Original Research Article Applied Surface Science, vol. 407, 15 June 2017, pp. 532–539.

- [2] Trubyanov M. M., Drozdov P. N., Atlaskin A. A., Battalov S. V., Puzanov Ye. S., Vorotyntsev A. V., Petukhov A. N., Vorotyntsev V. M., Vorotyntsev I. V. Unsteady-state membrane gas separation by novel pulsed retentate mode for improved membrane module performance: Modelling and experimental verification / Original Research Article. *Journal of Membrane Science*, vol. 530, 15 May 2017, pp. 53–64.
- [3] Kosyanchuk V., Kovalev V., Yakunchikov A. Multiscale modeling of a gas separation device based on effect of thermal transpiration in the membrane. Original Research Article. *Separation and Purification Technology*, vol. 180, 8 June 2017, pp. 58–68.
- [4] Yan Yang, Chuang Wen. CFD modeling of particle behavior in supersonic flows with strong swirls for gas separation / Original Research Article. *Separation and Purification Technology*, vol. 174, 1 March 2017, Pp. 22–28.
- [5] Dongxiao Yang, Haoyu Ren, Yaxiao Li, Zhi Wang. Suitability of cross-flow model for practical membrane gas separation processes / Original Research Article. *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 117, January 2017, pp. 376–381.
- [6] Lingzi Wang, Jianmei Feng, Xiang Gao, Xueyuan Peng. Investigation on the oil-gas separation efficiency considering oil droplets breakup and collision in a swirling flow / Original Research Article. *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 117, January 2017, pp. 394–400.
- [7] Long Han, Guangyi Deng, Zheng Li, Qinhui Wang, Klein E. Iteleji. Integration optimisation of elevated pressure air separation unit with gas turbine in an IGCC power plant / Original Research Article. *Applied Thermal Engineering*, vol. 110, 5 January 2017, pp. 1525–1532.
- [8] Basok B. I., Ryzhkov S. S., Avramenko A. A. *Issledovanie vliyaniya temperatury na protsess ulavlivaniya vysokodispersnykh chastits aerolya v gladkom kanale* [Study of the impact of temperature on the process of capturing of highly dispersed aerosol particles in a smooth channel]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial heat engineering], 2006, no. 1, pp. 67–75.
- [9] Serbin S. I., Ryzhkov R. S. Experimental investigations of efficiency of the turboimpact breathing systems separator for gas turbine installation of closed cycle. *Shipbuilding and marine infrastructure*, 2015, no. 2, pp. 164–172.
- [10] Ryzhkov S. S. *Uzahalnena matematychna model vyznachennia intensyvnosti protsesu ochystky dyspersnykh bahatofaznykh potokiv u systemakh enerhetychnykh ustanovok* [Generalized mathematical model for determination of the intensity of the proces of cleaning of the disperse multiphase flows in the systems of power plants]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUOS*, 2014, no. 3, pp. 69–76.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Создание высокоэффективных и экономичных тепло- и массообменных аппаратов, сепарирующих устройств является значительным резервом повышения коэффициентов полезного действия энергетических установок, улучшения использования топливно-энергетических ресурсов. Актуальность применения трехмерного моделирования сепарационных градиентных аэрозольных технологий для изготовления маслоотделителя обусловлена проблемой обеспечения эффективной очистки промышленных выбросов от вредных жидких примесей.

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В исследованиях газодинамики, переноса тепла и массы широко известны работы зарубежных авторов и ряда научных украинских школ, результатом которых стали разработки сепарационного оборудования широкого применения.

В работе [1] выполнены теоретические исследования очистки газов в нанопористых графитовых мембранах. Данная технология позволяет улавливать жидкие и твердые частицы диаметром до 1 мкм; од-

нако сепарационные кассеты с нанопористыми графитными мембранами ограничены во времени эксплуатации и их замена влечет дополнительные затраты. Данная технология не подходит для улавливания высокодисперсных частиц масла для систем суфлирования газотурбинного двигателя. В публикации [2] авторы предлагают использовать мембранные технологии для очистки нестационарных течений. Данная технология позволяет интенсифицировать осаждение жидкой фазы в газовом потоке за счет дополнительных пульсаций среды. В [3] рассмотрено интенсифицирование осаждения за счет ввода значительных градиентов температуры в каналах осаждения и подтверждена данная технология расчетами различных конструкций элементов сепаратора. В [4] выполнено CFD-моделирование поведения частиц в сверхскорых каналах осаждения и определена эффективность осаждения. В [5] авторы изучили различные мембранные каналы и выявили оптимальные для осаждения частиц. Разработали модель для смешанных потоков, которая может быть применена для расчетов осаждения в конструкциях сепараторов. В [6] охарактеризованы технологии улавливания масляного аэрозоля в сепарационных каналах. Особенностью данной

работы является то, что авторы исследовали процессы укрупнения и дробления капель в сепарационных каналах. Разработаны модели, которые позволят более детально понимать процессы улавливания масляного аэрозоля. В [7] авторы предложили разработку сепарационной технологии для газотурбинного двигателя производства IGCC. В [8] проанализировано влияние перепада температур на осаждения высокодисперсных частиц в гладких каналах. Экспериментальным путем установлено, что перепад температур позволяет увеличить на 10–20% осаждение в сепараторе. В [9] авторы разработали турбоимпактный сепаратор для замкнутого цикла системы суфлирования газотурбинной установки. На основе выполненных ранее исследований построена обобщенная математическая модель определения интенсивности процесса очистки дисперсных многофазных потоков в системах энергетических установок [10].

Разработка сепараторов газотурбинных двигателей для расходов газовой среды 200 м<sup>3</sup>/ч на основе сепарационных градиентных аэрозольных технологий с коэффициентом очистки 99,9% обусловлена началом создания нового поколения двигателей на газотурбинных предприятиях КНР.

**ЦЕЛЬЮ СТАТЬИ** является применение трехмерного моделирования сепарационных градиентных аэрозольных технологий для создания маслоотделителей систем суфлирования ГТД с расходом газа до 800 м<sup>3</sup>/ч.

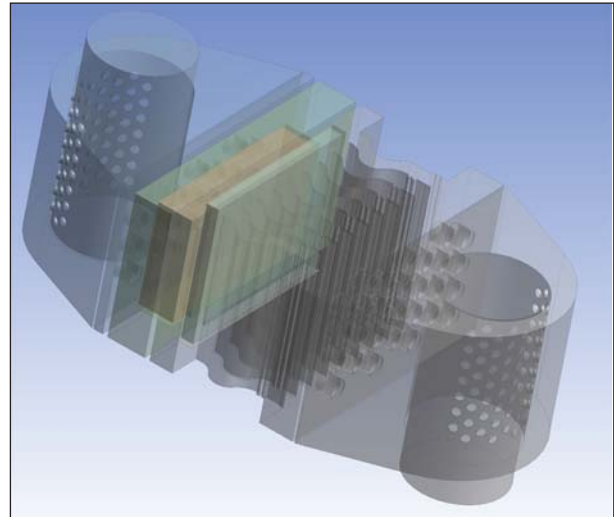
Для ее реализации решены следующие задачи: применена разработанная в [10] математическая модель градиентных сепарационных технологий; создана трехмерная модель маслоотделителя; выполнены расчеты гидродинамической обстановки в проточной части маслоотделителя; произведен расчет траектории частиц в проточной части маслоотделителя; изготовлены рабочие чертежи и опытный образец; проведены стендовые испытания маслоотделителя.

#### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

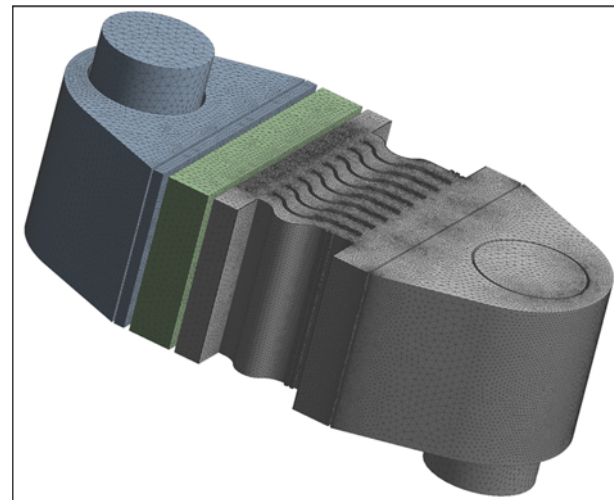
На основе предложенной математической модели [10] выполнено исследование газодинамики в проточной части канала (рис. 1) и получены значения коэффициентов осаждения при различных концентрациях жидкой фазы.

В процессе расчета задавались следующие параметры:

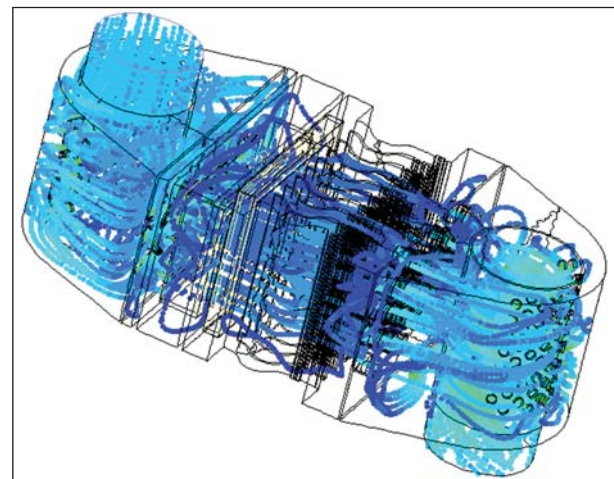
- трехмерная геометрия построена в реальном масштабе (длина 80 мм и высота 5...25 мм);
- расчетная сетка состоит из треугольных сегментов с площадью  $S = 30 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ ; параметры среды — нормальные условия;
- плотность газа  $\rho_g = 1,225 \text{ кг/м}^3$ ;
- вязкость  $\mu_r = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$ ;
- материал стенки канала — алюминий с шероховатостью 0,1 мм и плотностью  $\rho_{ал} = 2690 \text{ кг/м}^3$ ;



а)



б)



в)

**Рис. 1.** Трехмерная модель маслоотделителя  $G = 400\text{--}800 \text{ м}^3/\text{ч}$  на основе сепарационных градиентных аэрозольных технологий:

- а) трехмерный вид для построения расчетной сетки;  
 б) трёхмерная расчетная сетка конечных элементов;  
 в) траектория движения частиц в газоочистителе

- минимальный диаметр частиц:  $d_{\min}$  — 3 мкм;
- средний диаметр частиц:  $d_{\text{mid}}$  — 10 мкм;
- максимальный диаметр частиц:  $d_{\max}$  — 15 мкм;
- концентрация жидкой фазы  $C_{\text{вх}} = 0,6$  кг/м<sup>3</sup>;
- диапазон расходов —  $G = 400; 600; 800$  м<sup>3</sup>/ч.

Из графиков распределения статического давления (рис. 2) видно, что для  $G = 400$  м<sup>3</sup>/ч перепад давления в сепарирующих коагуляторах достигает 5,1 кПа.

Расчет траектории движения частиц в канале показал, что траектория совпадает с линией тока газовой среды в рабочем канале. На рис. 3 представлено распределение скорости в маслоотделителе при  $G = 400; 600; 800$  м<sup>3</sup>/ч.

Из расчета распределения скорости в маслоотделителе при  $G = 400$  м<sup>3</sup>/ч определено, что скорость в коагуляционном пакете не превышает 10 м/с.

Расчет осаждения частиц в маслоотделителе при  $G = 400; 600; 800$  м<sup>3</sup>/ч представлен в табл. 1.

Результаты расчета при  $G = 400$  м<sup>3</sup>/ч показали, что суммарный пульсационный эффект осаждения высокодисперсных частиц достигает 25,1%.

**Методика исследований маслоотделителей систем суфлирования ГТД.** Оптические измерения дисперсности и концентрации частиц производились с помощью фотоэлектрического счетчика аэрозольных частиц АЗ-5 и фотометра аэрозолей ФАН-У4.2 УХЛ. Погрешность измерения этими приборами не превышала 5%. Отбор проб проводился через заборные трубки, служившие одновременно трубками полного давления. При замерах соблюдались условия изокINETичности. Массовая концентрация частиц в потоке находилась отбором пробы дисперсной двухфазной среды аспиратором и пропусканием ее через аналитические фильтры АФА. Фильтры АФА взвешивались на аналитических весах с погрешностью  $\pm 0,1$  мг до и после взятия пробы. По привесу фильтра с учетом времени и расхода пробы газа определялась концентрация частиц по формуле:

$$C_{\text{ср}} = 1000 (m_{\text{н}} - m_{\text{к}}) / g_{\text{пр}} \tau,$$

где  $m_{\text{н}}$ ,  $m_{\text{к}}$  — масса фильтров до и после пробы, мг;  $g_{\text{пр}}$  — расход воздуха в период забора пробы через аспиратор, л/мин;  $\tau$  — время пробы, мин.

Расход масловоздушной среды вычислялся по перепаду давлений на расходомерном коллекторе, выполненном в виде профиля лемнискаты:

$$G = \alpha_k S_k \sqrt{\frac{2}{\rho} 9,81(p_1 - p_2)},$$

где  $\alpha_k$  — коэффициент расхода;  $\alpha_k = 0,99$ ;  $S_k$  — проходное сечение коллектора, м<sup>2</sup>;  $\rho$  — плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $p_1$  и  $p_2$  — статическое давление окружающей среды и в коллекторе, мм вод. ст.

Эффективность улавливания аэрозолей исследуемыми элементами рассчитывалась по формуле:

$$\eta_{\Sigma 0} = \left( 1 - \frac{C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}} \right) 100 \%,$$

где  $C_{\text{вх}}$  и  $C_{\text{вых}}$  — входная и выходная концентрация масляного аэрозоля, мг/м<sup>3</sup>. Взвешивание фильтров АФА осуществлялось на аналитических весах 17. Коэффициент суммарной эффективности очистки также находился по формуле:

$$\eta_{\Sigma 0} = \left( 1 - C_{\text{вых}} G_{\text{в}} / g_{\text{ул}} \right) 100 \%.$$

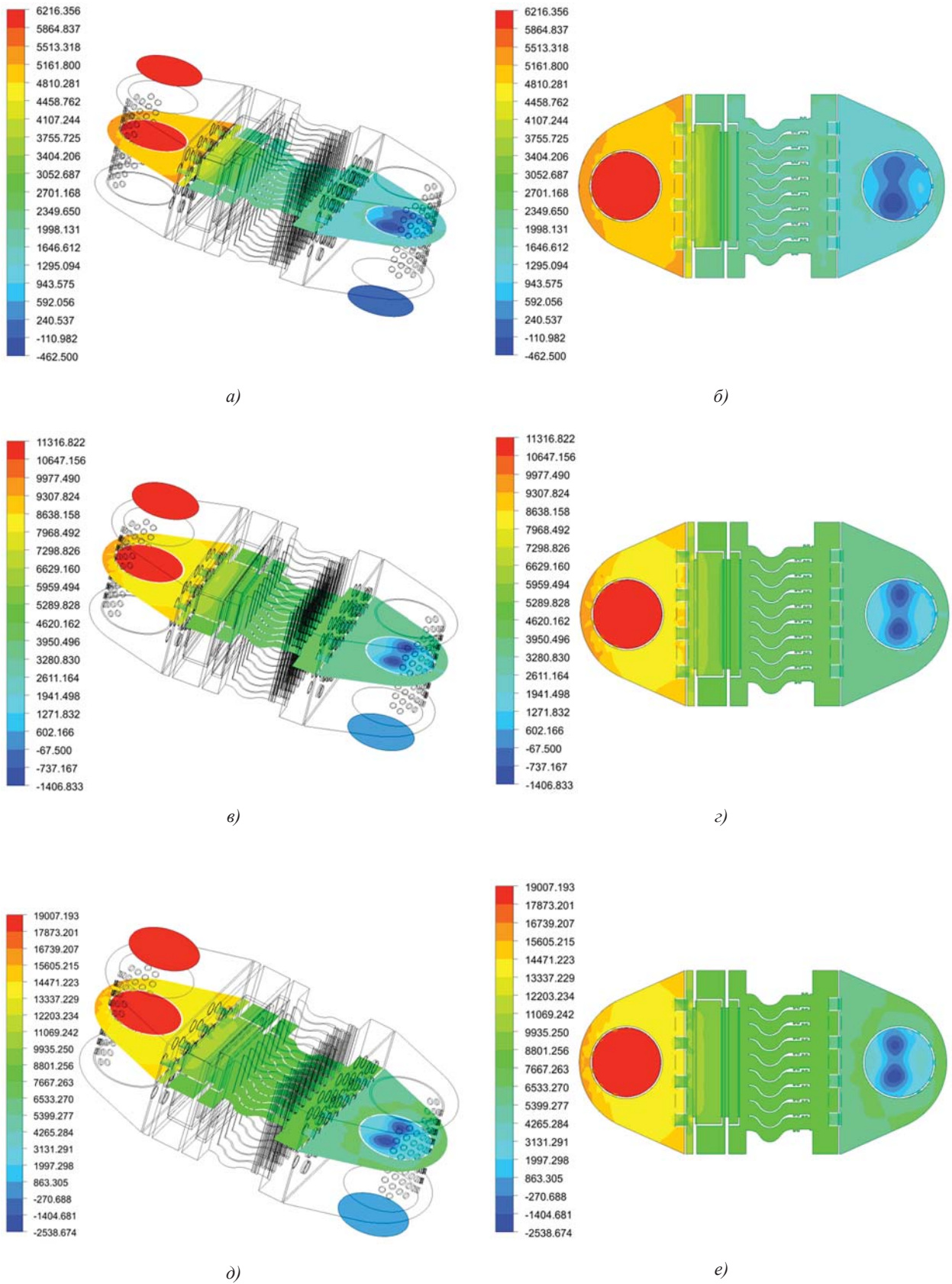
Методикой испытаний предусматривалась оценка эффективности в интервале расходов газа от 400; 600; 800 м<sup>3</sup>/ч при наличии охлаждения коагулятора и без охлаждения.

**Результаты стендовых исследований конструкции маслоотделителя и оценки его эффективности.** Для исследований был разработан и изготовлен опытный образец газоочистителя производительностью 400 м<sup>3</sup>/ч. Результаты стендовых испытаний представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что для коагулятора коэффициент суммарной эффективности очистки от капель масла составил 99,9%. Данный коэффициент получен при входной концентрации капель до 0,6 кг/м<sup>3</sup>, расходе газа от 400 до 800 м<sup>3</sup>/ч и температуре 80 °С. При этом аэродинамическое сопротивление отделителя равнялось 6,1 кПа, а выходная концентрация масла в очищенном воздухе при расходе газа 400 м<sup>3</sup>/ч — до  $C_{\text{вых}} = 59 \cdot 10^{-3}$  г/м<sup>3</sup>. Суммарный пульсационный эффект осаждения высокодисперсных частиц достигает 34,7%.

**Таблица 1.** Расчет осаждения в маслоотделителе при  $G = 400; 600; 800$  м<sup>3</sup>/ч

| Начальные условия                     |                         |  |                     |                           |                     | Без пульсации сетки                          |   |   | С пульсациями сетки                          |  |  | ΣПСЭ,<br>% |
|---------------------------------------|-------------------------|--|---------------------|---------------------------|---------------------|--|---|---|--|--|--|------------|
| $G_{\text{в}}$ ,<br>м <sup>3</sup> /ч | $T_{\text{вх}}$ ,<br>°С | $C_{\text{вх}}$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $d_{\min}$ ,<br>мкм | $d_{\text{mid}}$ ,<br>мкм | $d_{\max}$ ,<br>мкм | $d_{\min}$ ,<br>$g_{\text{вынос}}$ ,<br>мг/ч | $d_{\text{mid}}$ ,<br>$g_{\text{вынос}}$ ,<br>г/ч | $d_{\max}$ ,<br>$g_{\text{вынос}}$ ,<br>г/ч | $d_{\min}$ ,<br>$g_{\text{вынос}}$ ,<br>мг/ч | $d_{\text{mid}}$ ,<br>$g_{\text{вынос}}$ ,<br>мг/ч | $d_{\max}$ ,<br>$g_{\text{вынос}}$ ,<br>мг/ч |            |
| 400                                   | 80                      | 0,6                                    | 3                   | 10                        | 15                  | 22,4   | 0   | 0   | 17,3   | 0  | 0  | 25,1       |
| 600                                   | 80                      | 0,6                                    | 3                   | 10                        | 15                  | 16,3   | 0   | 0   | 13,2   | 0  | 0  | 21,8       |
| 800                                   | 80                      | 0,6                                    | 3                   | 10                        | 15                  | 18,8   | 0   | 0   | 16,4   | 0  | 0  | 13,0       |



**Рис. 2.** Распределение статического давления в маслоотделителе:  
 а), б) — при  $G = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; в), г) — при  $G = 600 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; д), е) — при  $G = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$

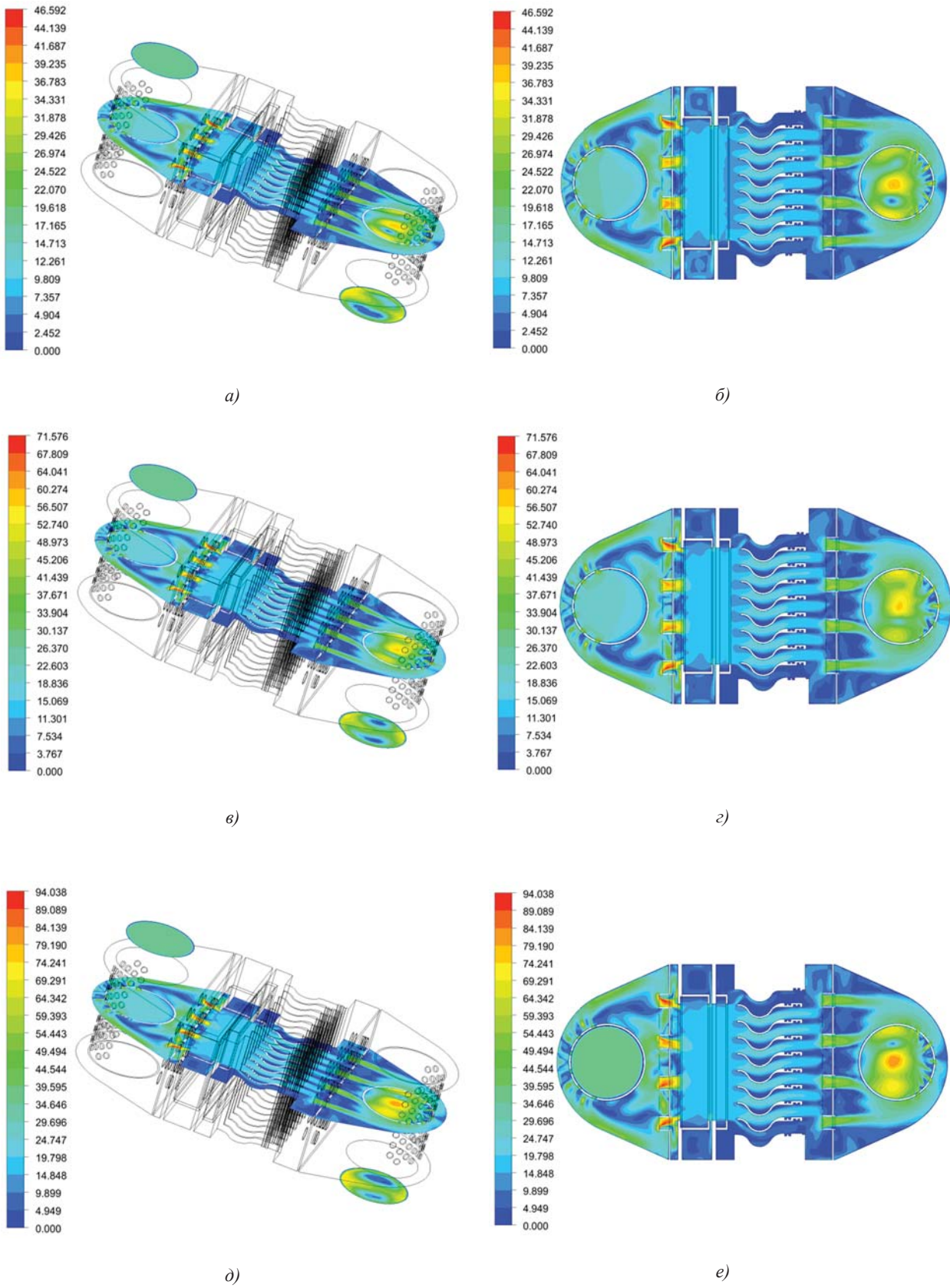


Рис. 3. Распределение скорости в маслоотделителе:  
 а), б) — при  $G = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; в), г) — при  $G = 600 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; д), е) — при  $G = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$

Таблица 2. Исследование маслоотделителя.  $G = 400; 600; 800 \text{ м}^3/\text{ч}$ 

| $G_{\text{вх}}, \text{ м}^3/\text{ч}$ | $T_{\text{вх}}, \text{ }^\circ\text{C}$ | $C_{\text{вх}}, \text{ кг/м}^3$ | $\eta_{\Sigma}$ | $\Delta P, \text{ кПа}$ | $C_{\text{вых}}, \text{ г/м}^3$ | $g_{\text{вынос}}, \text{ мг/ч}$ | $C_{\text{вых}}, \text{ г/м}^3$<br>ПСЭ | $g_{\text{вынос}}, \text{ мг/ч}$<br>ПСЭ | $\Sigma \text{ПСЭ}$ |
|---------------------------------------|---|---------------------------------|-----------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|---|---------------------|
| 400                                   | 80                                      | 0,6                             | 99,9            | 2,5                     | $62 \cdot 10^{-3}$              | 24,8                             | $41 \cdot 10^{-3}$                     | 16,4                                    | 33,8                |
| 400                                   | 80                                      | 0,6                             | 99,9            | 2,5                     | $69 \cdot 10^{-3}$              | 27,6                             | $45 \cdot 10^{-3}$                     | 18,0                                    | 34,7                |
| 400                                   | 80                                      | 0,6                             | 99,9            | 2,5                     | $59 \cdot 10^{-3}$              | 23,6                             | $44 \cdot 10^{-3}$                     | 17,6                                    | 25,4                |
| 600                                   | 80                                      | 0,6                             | 99,9            | 2,5                     | $83 \cdot 10^{-3}$              | 49,8                             | $64 \cdot 10^{-3}$                     | 38,4                                    | 22,8                |
| 600                                   | 80                                      | 0,6                             | 99,9            | 2,5                     | $77 \cdot 10^{-3}$              | 46,2                             | $67 \cdot 10^{-3}$                     | 40,2                                    | 12,9                |
| 600                                   | 80                                      | 0,6                             | 99,9            | 2,5                     | $81 \cdot 10^{-3}$              | 48,6                             | $63 \cdot 10^{-3}$                     | 37,8                                    | 22,2                |
| 800                                   | 80                                      | 0,6                             | 99,9            | 2,5                     | $95 \cdot 10^{-3}$              | 76,0                             | $87 \cdot 10^{-3}$                     | 69,6                                    | 8,4                 |
| 800                                   | 80                                      | 0,6                             | 99,9            | 2,5                     | $98 \cdot 10^{-3}$              | 78,4                             | $89 \cdot 10^{-3}$                     | 71,2                                    | 9,1                 |
| 800                                   | 80                                      | 0,6                             | 99,9            | 2,5                     | $103 \cdot 10^{-3}$             | 82,4                             | $92 \cdot 10^{-3}$                     | 73,6                                    | 10,6                |

Исследования эффективности отделителя при пульсации сеточного коагулятора с соответствующей частотой:

$$u_y = 2 \cdot A \cdot \pi \cdot v \cos(2\pi \cdot v),$$

где  $A = 0,00002 \text{ мм}$  — амплитуда;  $v = 10000 \text{ Гц}$  — частота колебаний, показали положительное влияние на качество очистки. Таким образом, за счет использования пульсационного коагулятора можно производить улавливание паров масла до их насыщенного состояния при температуре подающего холодного масла.

**ВЫВОДЫ.** 1. Осуществлено трехмерное моделирование сепарационных градиентных аэрозольных технологий и создание на их основе усовершенствованных маслоотделителей систем суфлирования ГТД с контактными уплотнениями с расходом газа до  $800 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Для этого разработана трехмерная модель маслоотделителя, выполнены расчеты гидродинамической обстановки в проточной части маслоотделителя, произведен расчет траектории частиц в про-

точной части маслоотделителя, изготовлены рабочие чертежи и опытный образец производительностью  $G = 400 \dots 800 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

2. Проведены стендовые испытания маслоотделителя, которые показали, что коэффициент суммарной эффективности очистки от масляного аэрозоля составляет более 99,99%. При этом суммарный пульсационный сепарационный эффект при  $G = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$  —  $\Sigma \text{ ПСЭ} = 34,7\%$ ; при  $G = 600 \text{ м}^3/\text{ч}$  —  $\Sigma \text{ ПСЭ} = 25,8\%$ ; а при  $G = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$  —  $\Sigma \text{ ПСЭ} = 13,0\%$ .

3. На основе предложенной конструкции возможно создание очистителей для улавливания аэрозолей в системах, суфлирования ГТД, вентиляции картера ДВС, вентиляции маслобаков главных циркуляционных насосов турбин АЭС, комфортного и технического кондиционирования, вентиляции редукторов главных турбозубчатых агрегатов, очистки сжатого воздуха, сушки пищевых и медицинских препаратов и др.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Theoretical investigation of gas separation in functionalized nanoporous graphene membranes [Текст] / Yong Wang, Qingyuan Yang, Chongli Zhong, Jinping Li // Original Research Article Applied Surface Science. — Vol. 407. — Pp. 532–539.
- [2] Unsteady-state membrane gas separation by novel pulsed retentate mode for improved membrane module performance: Modelling and experimental verification [Текст] / Maxim M. Trubyanov, Pavel N. Drozdov, Artem A. Atlaskin, Stanislav V. Battalov, Egor S. Puzanov, Andrey V. Vorotyntsev, Anton N. Petukhov, Vladimir M. Vorotyntsev, Ilya V. Vorotyntsev // Original Research Article. Journal of Membrane Science. — Vol. 530. — 2017. — Pp. 53–64.
- [3] Kosyanchuk V. Multiscale modeling of a gas separation device based on effect of thermal transpiration in the membrane [Текст] / V. Kosyanchuk, V. Kovalev, A. Yakunchikov // Original Research Article. Separation and Purification Technology. — Vol. 180. — 2017. — Pp. 58–68.
- [4] Yan Yang CFD modeling of particle behavior in supersonic flows with strong swirls for gas separation [Текст] / Yan Yang, Chuang Wen // Original Research Article. Separation and Purification Technology. — Vol. 174. — 2017. — Pp. 22–28.
- [5] Suitability of cross-flow model for practical membrane gas separation processes [Текст] / Dongxiao Yang, Haoyu Ren, Yaxiao Li, Zhi Wang. / Original Research Article. Chemical Engineering Research and Design. — Vol. 117. — 2017. — Pp. 376–381.
- [6] Investigation on the oil–gas separation efficiency considering oil droplets breakup and collision in a swirling flow [Текст] / Lingzi Wang, Jianmei Feng, Xiang Gao, Xueyuan Peng // Original Research Article. Chemical Engineering Research and Design. — Vol. 117. — 2017. — Pp. 394–400.

- [7] Integration optimisation of elevated pressure air separation unit with gas turbine in an IGCC power plant [Текст] / Long Han, Guangyi Deng, Zheng Li, Qinhui Wang, Klein E. Ibeleji // Original Research Article. Applied Thermal Engineering. — Vol. 110. — 2017. — Pp. 1525–1532.
- [8] **Басок Б. И.** Исследование влияния температуры на процесс улавливания высокодисперсных частиц аэрозоля в гладком канале [Текст] / Б. И. Басок, С. С. Рыжков, А. А. Авраменко // Промышленная теплотехника. Международный научно-прикладной журнал. — № 1. — 2006. — С. 67–75.
- [9] **Сербін С. І.** Експериментальні дослідження ефективності турбоімпактного сепаратора систем суфлювання ГТУ замкнутого циклу [Текст] / С. І. Сербін, Р. С. Рижков. — Миколаїв : НУК, 2015. — С. 164–172.
- [10] **Рижков С. С.** Узагальнена математична модель визначення інтенсивності процесу очистки дисперсних багатофазних потоків у системах енергетичних установок [Текст] / С. С. Рижков // Збірник наукових праць НУК. — 2014. — № 3. — С. 69–76.

---

© С. С. Рижков

Надійшла до редколегії 21.02.2017  
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