



Serhiy S. Ryzhkov
Рыжков Сергей Сергеевич

УДК 629.12.03
P93

APPLICATION OF THREE-DIMENSIONAL MODELING FOR GRADIENT AEROSOL TECHNOLOGIES FOR SEPARATING ICE CRANKCASE GASES

ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ГРАДИЕНТНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЕПАРАЦИИ КАРТЕРНЫХ ГАЗОВ ДВС

DOI 10.15589/SMI20170115

Serhiy S. Ryzhkov

С. С. Рыжков, канд. техн. наук, доц.
sergiy.ryzhkov@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0002-2201-6172

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. Three-dimensional modeling has been applied for gradient aerosol technologies designed for separating crankcase gases of internal combustion engines. Three-dimensional models are created for the numerical experiment of an improved prototype oil separator. Studies are carried out for the range of the crankcase gas flow rate of 2...10 m³/h. Based on the calculations, a prototype separator was developed; its experimental studies were carried out on a special stand. The coefficient of the total purification efficiency is determined; it reaches 99.9%.

Keywords: separator; oil separator; aerosol technologies; three-dimensional computational grid; static pressure; coefficient of efficiency.

Аннотация. Применено трехмерное моделирование для градиентных аэрозольных технологий сепарации картерных газов двигателей внутреннего сгорания. Созданы трёхмерные модели для численного эксперимента усовершенствованного маслоотделителя-прототипа. Выполнены исследования в диапазоне расходов картерных газов 2...10 м³/ч. На основе расчетов создан опытный образец сепаратора и выполнены его экспериментальные исследования на специальном стенде. Определен коэффициент суммарной эффективности очистки, который достигает 99,9%.

Ключевые слова: сепаратор; маслоотделитель; аэрозольные технологии; трехмерная расчетная сетка; статическое давление; коэффициент эффективности.

Анотація. Застосовано тривимірне моделювання для градієнтних аерозольних технологій сепарації картерних газів двигунів внутрішнього згоряння. Створено тривимірні моделі для чисельного експерименту вдосконаленого масловіддільника-прототипу. Виконано дослідження в діапазоні витрат картерних газів 2...10 м³/год. На основі розрахунків створено дослідний зразок сепаратора та виконано його експериментальні дослідження на спеціальному стенді. Визначено коефіцієнт сумарної ефективності очищення, який досягає 99,9%.

Ключові слова: сепаратор; масловіддільувач; аерозольні технології; тривимірний розрахункова сітка; статичний тиск; коефіцієнт ефективності.

References

- [1] Yong Wang, Qingyuan Yang, Chongli Zhong, Jinping Li. Theoretical investigation of gas separation in functionalized nanoporous graphene membranes. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 407, pp. 532–539.
- [2] Trubyanov M., Drozdov P., Atlaskin A., Battalov S., Puzanov E., Vorotyntsev A., Petukhov A., Vorotyntsev V., Vorotyntsev I. Unsteady-state membrane gas separation by novel pulsed retentate mode for improved membrane module performance: Modelling and experimental verification. *Journal of Membrane Science*, 2017, vol. 530, 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. *Separation and Purification Technology*, 2017, vol. 180, pp. 58–68.
- [4] Yan Yang, Chuang Wen. CFD modeling of particle behavior in supersonic flows with strong swirls for gas separation. *Separation and Purification Technology*, 2017, vol. 174, pp. 22–28.

- [5] Dongxiao Yang, Haoyu Ren, Yaxiao Li, Zhi Wang. Suitability of cross-flow model for practical membrane gas separation processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, vol. 117, 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. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, vol. 117, pp. 394–400.
- [7] Long Han, Guangyi Deng, Zheng Li, Qinhui Wang, Klein E. Ijeleji. Integration optimisation of elevated pressure air separation unit with gas turbine in an IGCC power plant. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 110, pp. 1525–1532.
- [8] Basok B. I., Ryzhkov S. S., Avramenko A. A. Issledovaniye vliyaniya temperatury na protsess ulavlivaniya vysokodispersnykh chastits aerolya v gladkom kanale [Investigation of the effect of temperature on the process of collection 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 separator of the breathing systems of gas turbine plants 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 determining the intensity of the process of purification of dispersed multiphase flows in power plant systems]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK – Collection of Scientific Publications of NUOS*, 2014, no. 3, pp. 69–76.
- [11] Ryzhkov S. S. *Ustroystvo dlya odeleniya zhidkosti ot gaza* [Device for separating liquid from gas]. A.C. N1071873 CCCP.

Problem statement. Introduction of new, advanced power plants in transport and its rapid development has contributed to the growth of interest in the problems of two-phase disperse media. Creation of highly efficient and economical heat and mass transfer devices and separators is a significant reserve for increasing the coefficient of efficiency for power plants and improving the use of the fuel and energy resources. The relevance of the use of three-dimensional modeling of separation aerosol technologies for the creation of oil separators for the ICE crankcase gases is caused by the problem of reducing losses of expensive oils and ensuring effective purification of transport vehicles' harmful emissions into the atmosphere.

Latest research and publications analysis. Among the studies of gas dynamics, heat and mass transfer, there is a number of well-known publications by foreign authors and some Ukrainian “scientific schools” (scholar traditions), which resulted in the development of separation equipment of wide application.

Thus, publication [1] presents theoretical studies of gas purification in nanoporous graphite membranes. This technology allows collecting liquid and solid particles with a diameter of up to 1 μm . Yet, separation cassettes with nanoporous graphite membranes are limited in time of their operation, and their replacement requires additional expenses. This technology is not applicable for collecting highly dispersed oil particles for gas turbine engine's breathing systems. In [2], the authors propose using membrane technologies for purification of unsteady flows. This technology allows intensifying precipitation of the liquid phase in the gas flow due to additional pulsations of the medium. In work [3], the authors propose

Постановка проблемы. Внедрение новых энергетических установок на транспорте и его стремительное развитие способствовало росту интереса к проблемам двухфазных дисперсных сред. 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 аэрозольных технологий для изготовления маслоотделителей картерных газов ДВС обусловлена проблемой снижения потерь дорогостоящих масел и обеспечения эффективной очистки выбросов от транспортных средств вредных веществ в атмосферу.

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 [1] выполнено теоретическое изучение очистки газов в нанопористых графитовых мембранах. Данная технология позволяет улавливать жидкие и твердые частицы диаметром до 1 мкм, однако, сепарационные кассеты с нанопористыми графитными мембранами ограничены во времени работы и их замена влечет дополнительные затраты. Данная технология не применима для улавливания высокодисперсных частиц масла для систем суфлирования газотурбинного двигателя. В [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] авторы пытаются интенсифицировать осаждение за

to intensify precipitation by introducing substantial temperature gradients in the precipitation channels and prove this technology by calculation of various designs of the separator elements. The authors of publication [4] have performed CFD simulation of the particle's behavior in supersonic precipitation channels and determined the precipitation efficiency. In [5], the authors have studied various membrane channels and determined the optimal ones for the precipitation of particles. There has been developed a model for mixed flows, which can be applied for calculating precipitation in the separator structure. The authors of the work [6] have studied technologies for collecting oil aerosol in separation channels. A special feature of this work is the study of the processes of coarsening and breakup of droplets in separation channels. There have been developed models that provide more insight in the processes of collecting an oil aerosol. In work [7], the authors have proposed the development of a separation technology for a gas turbine engine produced by IGCC. In [8], the authors have studied the effect of a temperature drop on precipitation of highly dispersed particles in smooth channels. It has been experimentally established that the temperature drop allows a 10–20% increase in precipitation in the separator. The authors of publication [9] have developed a turboimpact separator for a closed cycle of the gas turbine plant's breathing system. A general mathematical model for determining the intensity of purification of dispersed multiphase flows in power plant systems has been developed on the basis of the previous works [10].

The development of separators for gas turbine engines with gas flow rates ranging from 2 to 10 m³/h on the basis of separation gradient aerosol technologies with a purification coefficient of 99.9% is caused by the launch of creation of a new generation of engines at the gas turbine enterprises of the People's Republic of China.

THE ARTICLE AIM is to develop an oil separator for crankcase gases of internal combustion engines with gas flow rates of 2–10 m³/h on the basis of three-dimensional modeling of separation gradient aerosol technologies.

To achieve this aim, the following objectives have been set:

- to choose a prototype of the oil separator's design for its improvement based on three-dimensional modeling of separation gradient aerosol technologies;
- to develop a sectional structural scheme and a three-dimensional model of the oil separator;
- to perform calculations of the hydrodynamic situation and trajectory of particles in the flow channel of the separator;
- to make the operational drawings and prototype;
- to perform stand tests of the separator.

счет ввода значительных градиентов температуры в каналах осаждения и подтверждают данную технологию расчетами различных конструкций элементов сепаратора. В [4] выполнено CFD моделирование поведения частиц в сверхзвуковых каналах осаждения и определена эффективность осаждения. В [5] изучены различные мембранные каналы и найдены оптимальные для осаждения частиц. Разработана модель для смешанных потоков, которая может быть использована для расчетов осаждения в конструкциях сепараторов. В [6] исследованы технологии улавливания масляного аэрозоля в сепарационных каналах. Особенностью данной работы является то, что авторы изучили процессы укрупнения и дробления капель в сепарационных каналах. Разработаны модели, которые позволят более детально понимать процессы улавливания масляного аэрозоля. В [7] предложена разработка 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] разработан турбоимпактный сепаратор для замкнутого цикла системы суфлирования газотурбинной установки. На основе выполненных ранее исследований создана обобщенная математическая модель определения интенсивности процесса очистки дисперсных многофазных потоков в системах энергетических установок [10].

Разработка сепараторов газотурбинных двигателей для расходов газовой среды 2–10 м³/ч на основе сепарационных градиентных аэрозольных технологий с коэффициентом очистки 99,9% обусловлена началом создания нового поколения двигателей на газотурбинных предприятиях КНР.

ЦЕЛЬЮ исследования является разработка маслоотделителя картерных газов двигателей внутреннего сгорания для расходов газовой среды 2–10 м³/ч на основе трехмерного моделирования сепарационных градиентных аэрозольных технологий.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- выбрать прототип конструкционного выполнения маслоотделителя для его усовершенствования на основе трехмерного моделирования сепарационных градиентных аэрозольных технологий;
- разработать посекционную конструктивную схему и трехмерную модель маслоотделителя;
- произвести расчеты гидродинамической обстановки и траектории частиц в проточной части сепаратора;
- изготовить рабочие чертежи и опытный образец;
- выполнить стендовые испытания сепаратора.

Изложение основного материала. В качестве прототипа использован маслоотделитель для очистки картерных газов, разработанный в НКИ–НУК в отделе проблем экологии и энергосбережения [11], рис. 1. Исследования сепаратора производились рас-

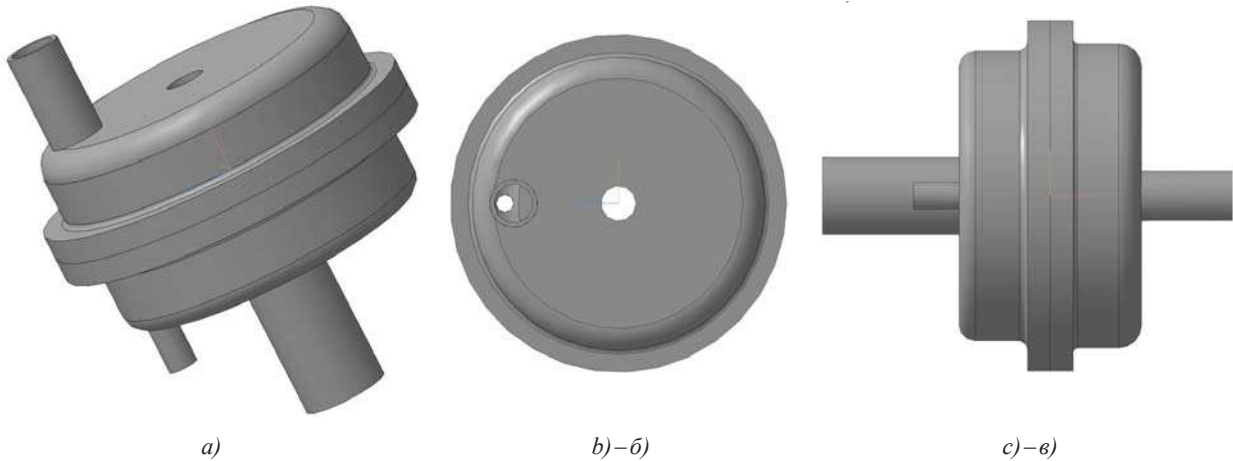


Fig. 1. Computational model of the oil separator for the flow rate range of $G = 2...10 \text{ m}^3/\text{h}$ on the basis of separation gradient aerosol technologies:

Рис. 1. Расчетная модель маслоотделителя-сепаратора для диапазона расходов $G = 2-10 \text{ м}^3/\text{ч}$ на основе сепарационных градиентных аэрозольных технологий:

a — isosymmetry/изосимметрия; *b* — side view/вид сбоку; *c* — bottom view/вид снизу

Basic material. Results of the separator studies.

As a prototype, the study employed an oil separator for purification of crankcase gases developed at the NUOS in the Department of Ecology and Energy Conservation Problems [11]. It is shown in Fig. 1. The separator studies were carried out using computation methods based on its three-dimensional model in the gas flow range of $2...10 \text{ m}^3/\text{h}$ (Fig. 1) and on the experimental stand, as well as in real conditions as a part of the engine. The gas dynamics of the flow was studied, and the precipitation coefficients were analyzed for different flow rates of the gas-oil medium.

Mathematical model for the study of separation gradient aerosol technologies. The thermophysical model of the process of particle transportation in the channel is based on the Reynolds Stress Transport equation with the calculation of individual stresses ($u'_i u'_j$) and has the following form:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{\mu_\bullet}{\sigma_\bullet} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right] + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu_L \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] - \\ - \rho \left[\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] - 2\mu_L \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k}. \end{aligned} \quad (2)$$

By analogy with the Reynolds Stress Transport equation, in order to take into account the non-isothermal parameters of the process, the calculation of convective heat transfer is performed using the energy equation:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + P)] = \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(k + \frac{C_p \mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

четными методами на основе его трехмерной модели в диапазоне расходов газов $2-10 \text{ м}^3/\text{ч}$ (рис. 1) и на экспериментальном стенде, а также в реальных условиях в составе двигателей. Исследовалась газодинамика потока и анализировались коэффициенты осаждения при разных расходах газомасляной среды.

Математическая модель для исследования сепарационных градиентных аэрозольных технологий. Используемая теплофизическая модель процессов переноса частиц в канале основана на транспортном уравнении напряжений Рейнольдса с расчетом индивидуальных напряжений ($u'_i u'_j$) и имела вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{\mu_\bullet}{\sigma_\bullet} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right] + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu_L \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] - \\ - \rho \left[\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] - 2\mu_L \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k}. \end{aligned} \quad (2)$$

По аналогии с транспортным уравнением напряжений Рейнольдса для учета неизотермических параметров процесса выполнен расчет конвективного теплопереноса с помощью уравнения энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + P)] = \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(k + \frac{C_p \mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где τ вычислялся как:

$$\tau = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}, \quad (4)$$

где

$$\mu_{eff} = \mu_T + \mu_L. \quad (5)$$

where τ was calculated as follows:

$$\tau = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}, \quad (4)$$

where

$$\mu_{eff} = \mu_T + \mu_L. \quad (5)$$

The equation of motion [3] is solved to simulate the trajectories of dispersed particles of a two-phase medium. It takes into account the force of inertia of the particle and other basic forces which have an impact upon it. In Cartesian coordinates, this equation is written as follows:

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} = F_D + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i, \quad (6)$$

where F_D is the resistance force for a unit mass of the particle:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D}{24} Re, \quad (7)$$

$$Re = \rho d_p \frac{|u_p - u|}{\mu}, \quad (8)$$

where F_i are the additional forces which have an impact on the particle.

The resistance coefficient C_D is calculated in the following way:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + b_1 Re^{b_2}) + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re}, \quad (9)$$

where b_i are the coefficients set polynomially.

The equation takes into account the additional forces F_i which have an impact on the particle. To account for the precipitation of particles under inertia, it is necessary to consider the acceleration of the flow around the particle. The force of inertia is calculated as follows:

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_k} \frac{\partial}{\partial t} (u - u_k). \quad (10)$$

The transverse displacement of particles can be caused not only by the gradient of the averaged gas velocity, but also by the inhomogeneity of the field of its pulsating velocities. The nonuniformity of the velocity profile leads to a directed displacement of the particle towards a decrease of the pulsation intensity. This effect, commonly referred to as turbulent migration or turbophoresis, is calculated by means of the following formula:

$$F_2 = -0,5 m_k \frac{\partial \overline{u_k'^2}}{\partial y}. \quad (11)$$

An additional force of the particle transportation appears in case of a pressure drop. It is called the diffusion-phoretic force, which can be calculated from the formula:

$$F_3 = \left(\frac{P}{P_w} \right) u_k \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (12)$$

Для моделирования траекторий дисперсных частиц двухфазной среды решалось уравнение движения [3], которое учитывало силу инерции частицы и другие основные силы, действующие на нее. В декартовых координатах это уравнение записывалось следующим образом:

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} = F_D + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i, \quad (6)$$

где F_D — сила сопротивления для единицы массы частицы:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D}{24} Re, \quad (7)$$

$$Re = \rho d_p \frac{|u_p - u|}{\mu}, \quad (8)$$

где F_i — дополнительные силы, действующие на частицу.

Коэффициент сопротивления C_D определялся как:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + b_1 Re^{b_2}) + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re}, \quad (9)$$

где b_i — полиномиально задаваемые коэффициенты.

Уравнение учитывает дополнительные силы F_i , которые действуют на частицу. Для учета осаждения частиц под действием силы инерции необходимо брать во внимание ускорение потока, обтекающего частицу. Сила инерции находится так:

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_k} \frac{\partial}{\partial t} (u - u_k). \quad (10)$$

Поперечное смещение частиц может быть вызвано не только градиентом осредненной скорости газа, но и неоднородностью поля его пульсационных скоростей. Неравномерность профиля скорости приводит к направленному смещению частицы в сторону уменьшения интенсивности пульсаций. Этот эффект, обычно именуемый турбулентной миграцией или турбофорезом, рассчитывается по формуле:

$$F_2 = -0,5 m_k \frac{\partial \overline{u_k'^2}}{\partial y}. \quad (11)$$

Дополнительная сила переноса частиц появляется в случае возникновения перепада давления и называется диффузиофоретической силой, которую можно определить по формуле:

$$F_3 = \left(\frac{P}{P_w} \right) u_k \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (12)$$

Расчетный эксперимент. Выполнено исследование газодинамики в проточной части канала 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);

Calculation experiment. There has been performed a study of gas dynamics in the flow part of the channel. As a result, the values of the precipitation coefficients are obtained for different concentrations of the liquid phase.

During the calculation, the following parameters were set:

- three-dimensional geometry constructed in real scale (length of 80 mm and height of 5...25 mm);
- computational grid constructed of triangular segments with the area $S = 30 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$;
- medium parameters — normal conditions;
- gas density $\rho_g = 1.225 \text{ kg/m}^3$;
- gas viscosity $\mu_g = 1.79 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$;
- material of the channel wall is aluminum with the roughness of 0.1 mm and density $\rho_{al} = 2690 \text{ kg/m}^3$;
- minimum particle diameter $d_{min} = 3 \text{ }\mu\text{m}$;
- average particle diameter $d_{mid} = 10 \text{ }\mu\text{m}$;
- maximum particle diameter $d_{max} = 15 \text{ }\mu\text{m}$;
- concentration of the liquid phase $C_{in} = 2-10 \text{ g/m}^3$;
- flow rate range $G = 2-10 \text{ m}^3/\text{h}$.

The distribution graphs of the study of gas dynamics in the flow part of the channel (Fig. 2–6) show that for $G = 2, 4, 6, 8, 10 \text{ m}^3/\text{h}$, the pressure drop in the separating coagulators reaches 0.2...3.5 kPa, respectively.

Calculation of the particle trajectory in the channel has shown that the particle flies through the entire channel in 0.2 s and its trajectory coincides with the line of the gaseous medium flow in the operating channel. Calculation of the velocity distribution in the oil separator at $G = 2...10 \text{ m}^3/\text{h}$ has shown that there are no stagnant zones in the channel and precipitation of the particles takes place in the zone of impact and turn of the stream in the flow channel.

There has been performed a calculation of the particle precipitation in the separator channel at $G = 2...10 \text{ m}^3/\text{h}$. (see Table 1)

- расчетная сетка составлена из треугольных сегментов с площадью $S = 30 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$;
- параметры среды — нормальные условия;
- плотность газа $\rho_r = 1,225 \text{ кг/м}^3$;
- вязкость $\mu_r = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$;
- материал стенки канала — алюминий с шероховатость 0,1 мм и плотностью $\rho_{ал} = 2690 \text{ кг/м}^3$;
- минимальный диаметр частиц d_{min} — 3 мкм;
- средний диаметр частиц d_{mid} — 10 мкм;
- максимальный диаметр частиц d_{max} — 15 мкм;
- концентрация жидкой фазы $C_{вх} = 2-10 \text{ г/м}^3$;
- диапазон расходов $G = 2-10 \text{ м}^3/\text{ч}$.

График распределения исследование газодинамики в проточной части канала (рис. 2–6) показывает, что для $G = 2, 4, 6, 8, 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ перепад давления в сепарирующих коагуляторах достигает 0,2...3,5 кПа соответственно.

Расчет траектории движения частиц в канале определил, что частица пролетает весь канал за 0,2 с и ее траектория совпадает с линией тока газовой среды в рабочем канале. Расчет распределения скорости в маслоотделителе при $G = 2-10 \text{ м}^3/\text{ч}$ показал, что в канале нет застойных зон и осаждения частиц происходит в зоне удара и разворота струи в канале течения.

Выполнен расчет осаждения частиц в канале сепаратора при $G = 2-10 \text{ м}^3/\text{ч}$. (см. Табл. 1)

Результаты расчета при $G = 2-10 \text{ м}^3/\text{ч}$ свидетельствуют, что коэффициент улавливания частиц достигает 99 %.

Методика исследований сепаратора. Оптические измерения дисперсности и концентрации частиц производились при помощи фотоэлектрического счетчика аэрозольных частиц АЗ-5 и фотометра аэрозолей ФАН-У4.2 УХЛ. Погрешность измерения этими

Table 1. Calculation of precipitation in the separator at $G = 2...10 \text{ m}^3/\text{h}$

Таблица 1. Расчет осаждения в сепараторе при $G = 2-10 \text{ м}^3/\text{ч}$

Air flow rate G_{air} , m^3/h Расход воздуха $G_{в}$, $\text{м}^3/\text{ч}$	Oil concentration C_{in} , g/m^3 Концентрация масла $C_{вх}$, г/м^3	Particle diameter, μm Диаметр частиц, мкм	Collection coefficient, % Коэффициент улавливания, %	Collected oil, g/h Уловленное масло, г/ч	Aerodynamic drag, kPa Аэродинамическое сопротивление, кПа	Mixture temperature, $^{\circ}\text{C}$ Температура смеси, $^{\circ}\text{C}$
2	2	3	74	0.90	0.2	20
		10	86	1.14		
		15	99	1.32		
4	4	3	79	4.21	0.8	
		10	89	4.74		
		15	99	5.28		
6	6	3	85	10.2	1.6	
		10	89	10.68		
		15	99	11.88		
8	8	3	89	18.98	2.5	
		10	93	19.84		
		15	99	21.12		
10	10	3	89	29.66	3.5	
		10	97	32.33		
		15	99	33.00		

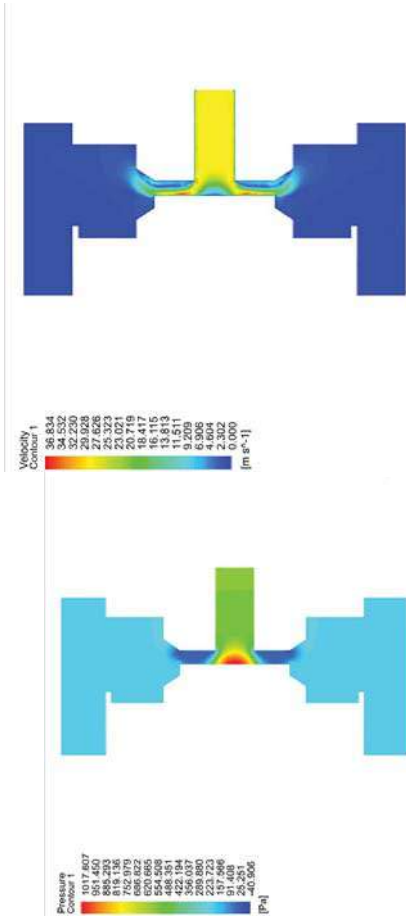
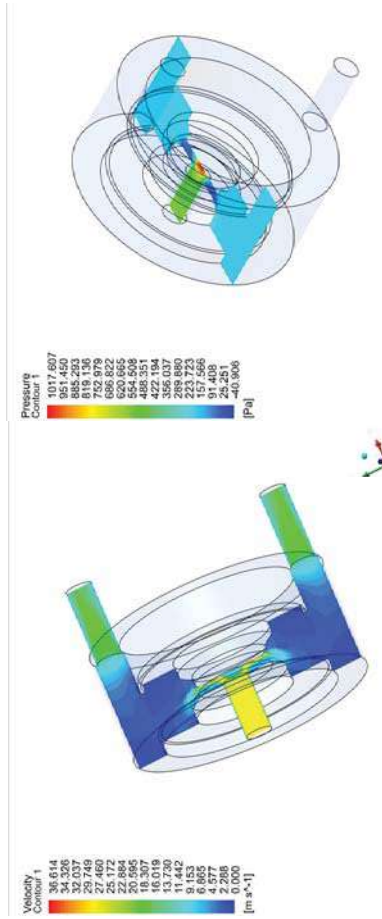
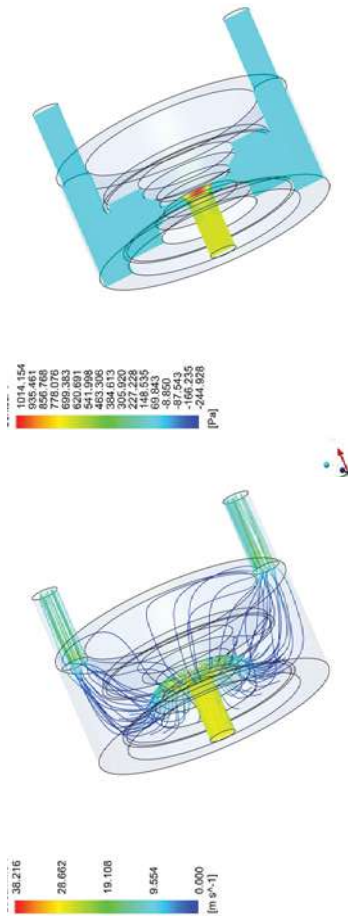


Fig. 3. Study of gas dynamics in the flow part of the channel at $G = 4 \text{ m}^3/\text{h}$
Рис. 3. Исследование газодинамики в проточной части канала при $G = 4 \text{ м}^3/\text{ч}$

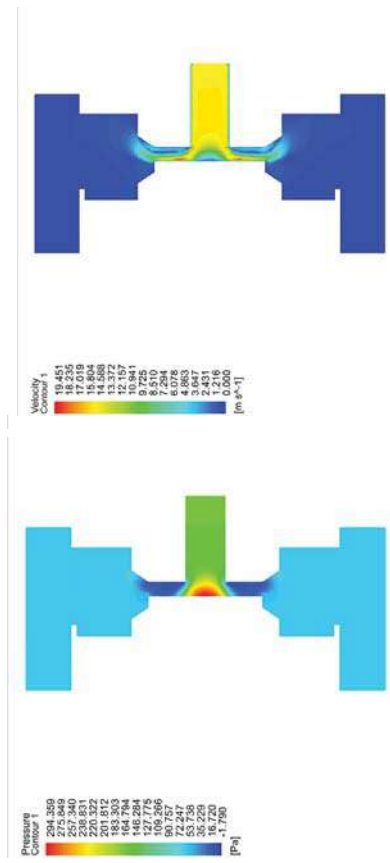
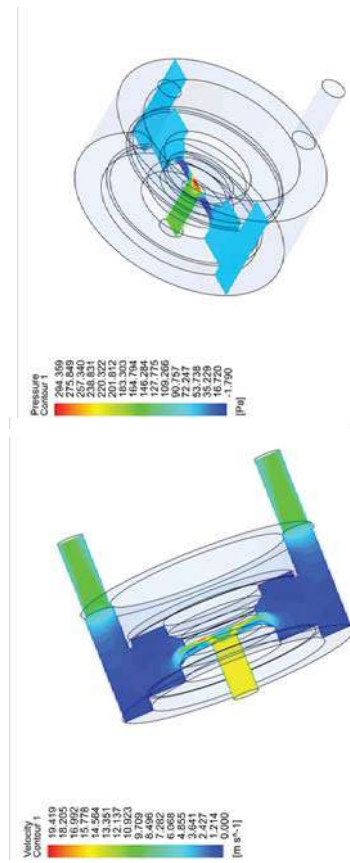
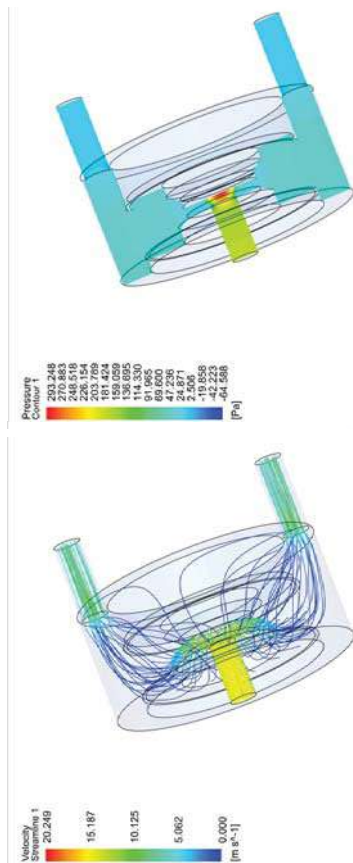


Fig. 2. Study of gas dynamics in the flow part of the channel at $G = 2 \text{ m}^3/\text{h}$
Рис. 2. Исследование газодинамики в проточной части канала при $G = 2 \text{ м}^3/\text{ч}$

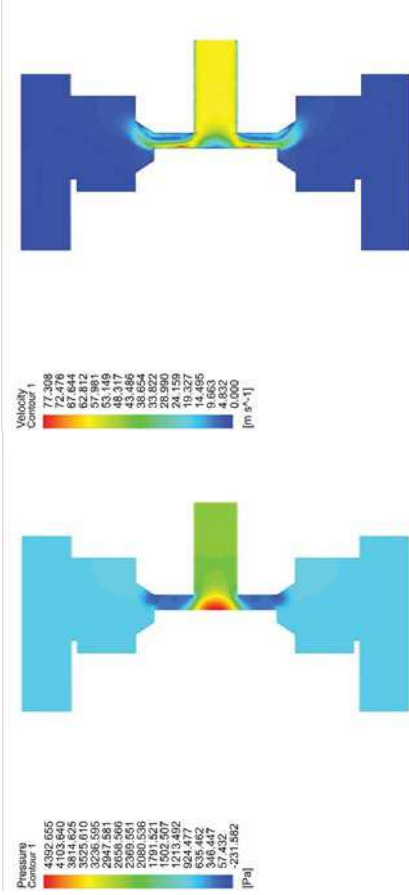
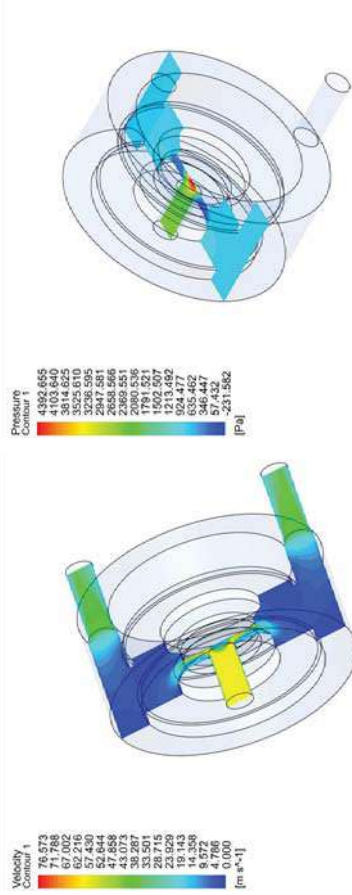
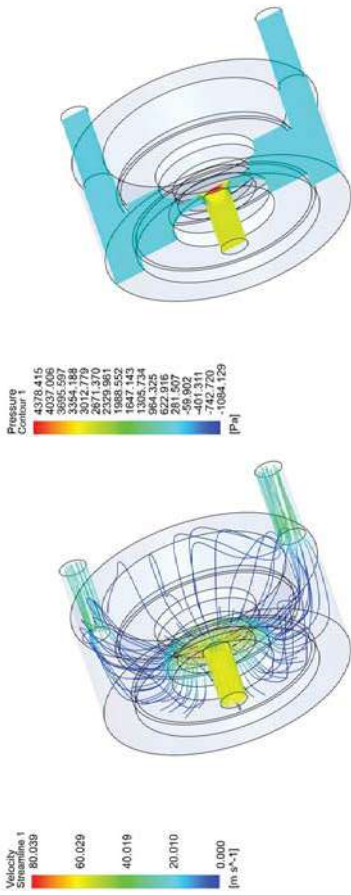


Fig. 5. Study of gas dynamics in the flow part of the channel at $G = 8 \text{ m}^3/\text{h}$
Рис. 5. Исследование газодинамики в проточной части канала при $G = 8 \text{ м}^3/\text{ч}$

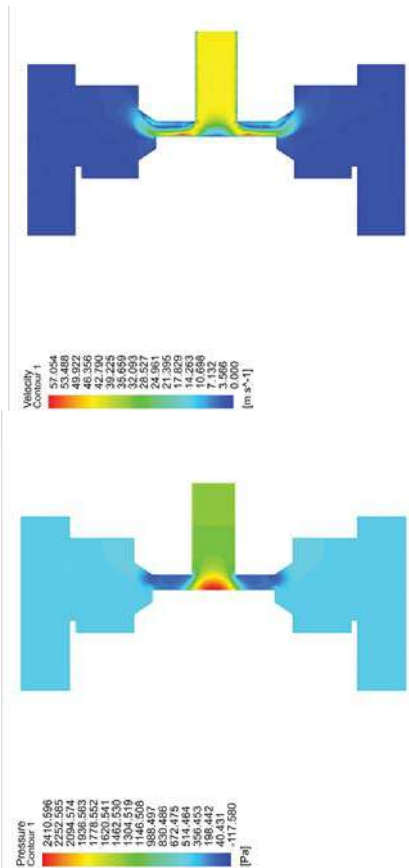
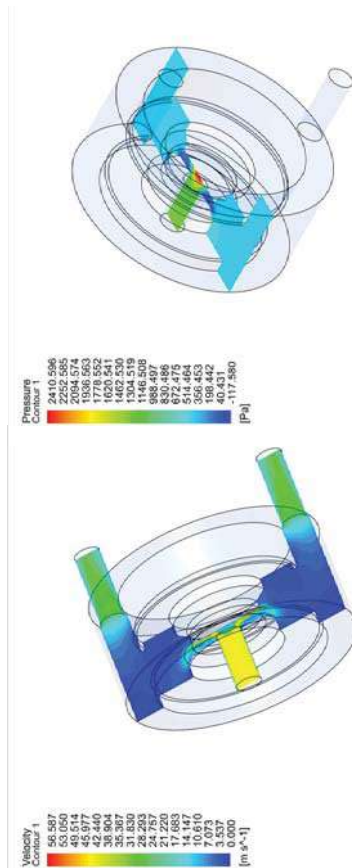
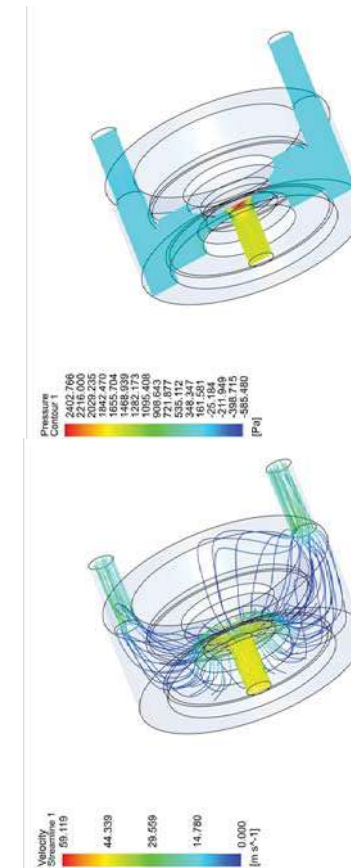


Fig. 4. Study of gas dynamics in the flow part of the channel at $G = 6 \text{ m}^3/\text{h}$
Рис. 4. Исследование газодинамики в проточной части канала при $G = 6 \text{ м}^3/\text{ч}$

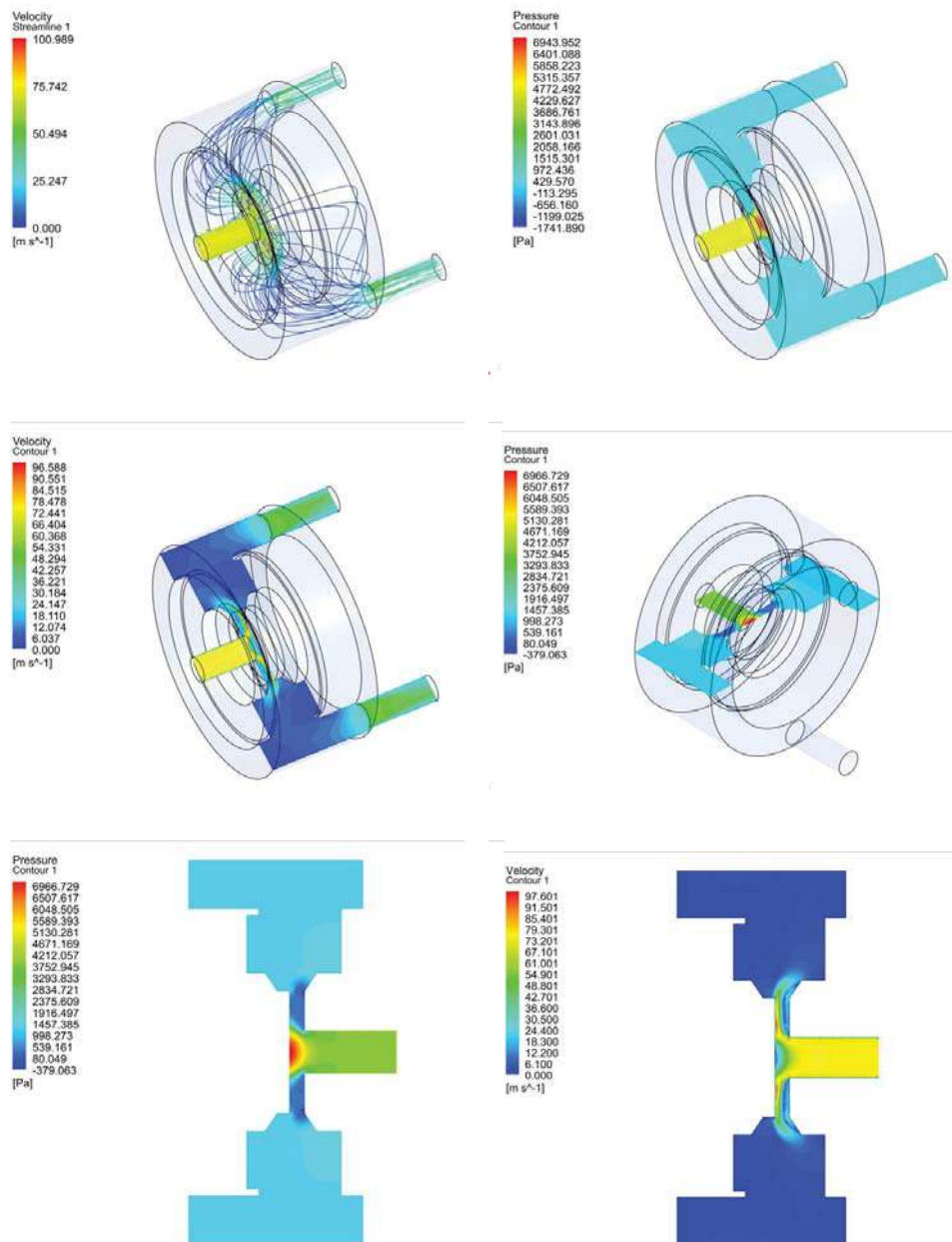


Fig. 6. Study of gas dynamics in the flow part of the channel at $G = 10 \text{ m}^3/\text{h}$

Рис. 6. Исследование газодинамики в проточной части канала при $G = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$

The calculation results at $G = 2...10 \text{ m}^3/\text{h}$ have shown that the coefficient of collection of the particles makes up 99%.

Methodology of the separator studies. Optical measurements of the particle dispersity and concentration employed the photoelectric counter of aerosol particles AZ-5 and the aerosol photometer FAN-U4.2 UHL. The measurement error in these devices did not exceed 5%. Sampling was carried out through sampling tubes, which at the same time served as pressure tubes (Fig. 7). Isokinetic conditions were maintained during measurement. The mass concentration of particles in the flow is repelled from the same patient through the analytical AFA filters. The AFA filters were weighed on analytical scales with the error of $\pm 0.1 \text{ mg}$ before and after sampling. The concentration of particles was determined by the filter

приборами не превышала 5%. Отбор проб проводился через заборные трубки, служившие одновременно трубками полного давления (рис. 7). При замерах соблюдались условия изокINETИЧНОСТИ. Массовая концентрация частиц в потоке находилась отбором пробы дисперсной двухфазной среды аспиратором и пропускания ее через аналитические фильтры АФА. Фильтры АФА взвешивались на аналитических весах с погрешностью $\pm 0,1 \text{ мг}$ до и после взятия пробы. По привесу фильтра с учетом времени и расхода пробы газа рассчитывалась концентрация частиц по формуле:

$$C_{\text{cp}} = 1000(m_{\text{н}} - m_{\text{к}})/g_{\text{пр}}\tau, \quad (14)$$

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; τ — время пробы, мин.

mass gain, taking into account the time and flow rate of the gas sample, with the use of the following formula:

$$C_{cp} = 1000(m_n - m_k)/g_s \tau, \quad (14)$$

where m_n and m_k are the filter masses before and after sampling, respectively, mg; g_s is the air flow rate during sampling through an aspirator, l/min; τ is the duration of sampling, min.

The air-oil medium flow rate was determined by the pressure drop on the flow-measuring collector made in the form of a lemniscate profile:

$$G = \alpha_k S_k \sqrt{\frac{2}{\rho} 9,81(p_1 - p_2)}, \quad (15)$$

where α_k is the flow rate coefficient, $\alpha_k = 0,99$; S_k is the flow cross-section of the collector, m^2 ; ρ is the medium density, kg/m^3 ; p_1 and p_2 are the static pressure of the environment and in the collector, respectively, mm of water column.

The effectiveness of aerosol collection by the elements under study was determined by the following formula:

$$\eta_{\Sigma 0} = \left(1 - \frac{C_{out}}{C_{in}}\right) 100 \%, \quad (16)$$

where C_{in} and C_{out} are the inlet and outlet concentration of the oil aerosol, respectively, mg/m^3 . The AFA filters were weighed on analytical scales. The coefficient of total purification efficiency was calculated with the use of the formula:

$$\eta_{\Sigma 0} = \left(1 - C_{out} G_a / g_{yl}\right), \quad (17)$$

The methodology of the study assumed the efficiency estimation to correspond to the range of the gas flow rate from 2 to 10 m^3/h .

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

$$G = \alpha_k S_k \sqrt{\frac{2}{\rho} 9,81(p_1 - p_2)}, \quad (15)$$

где α_k — коэффициент расхода, $\alpha_k = 0,99$; S_k — проходное сечение коллектора, m^2 ; ρ — плотность среды, kg/m^3 ; p_1 и p_2 — статическое давление окружающей среды и в коллекторе, мм вод. ст.

Эффективность улавливания аэрозолей исследуемыми элементами вычислялась следующим образом:

$$\eta_{\Sigma 0} = \left(1 - \frac{C_{вых}}{C_{вх}}\right) 100 \%, \quad (16)$$

где $C_{вх}$ и $C_{вых}$ — входная и выходная концентрация масляного аэрозоля mg/m^3 . Взвешивание фильтров АФА производилось на аналитических весах. Коэффициент суммарной эффективности очистки также рассчитывался по формуле:

$$\eta_{\Sigma 0} = \left(1 - C_{вых} G_a / g_{yl}\right), \quad (17)$$

Методикой испытаний предусматривалась оценка эффективности в интервале расходов газа от 2 до 10 $m^3/ч$.

Результаты стендовых исследований конструкции газоочистителя и оценки его эффективности. Для исследований был разработан и изготовлен опытный образец сепаратора производительностью $G = 2 - 10 m^3/ч$, рис. 7. Результаты стендовых испытаний представлены в табл. 2.



Fig. 7. Test sample of the oil separator with the productivity of $G = 2 - 10 m^3/h$

Рис. 7. Опытный образец маслоотделителя производительностью $G = 2 - 10 m^3/ч$

Table 2. Oil separator study. $G = 2 - 10 m^3/h$

Таблица 2. Исследование маслоотделителя. $G = 2 - 10 m^3/ч$

Air flow rate G_{air} , m^3/h Расход воздуха $G_{в}$, $m^3/ч$	Oil concentration C_{in} , g/m^3 Концентрация масла $C_{вх}$, $г/м^3$	Collection coefficient, % Коэффициент улавливания, %	Collected oil, g/h Уловленное масло, $г/ч$	Aerodynamic drag, kPa Аэродинамическое сопротивление, $кПа$	Mixture temperature, °C Температура смеси, °C
2	2	99	3.96	0.2	20
4	4		15.84	0.8	
6	6		35.64	1.6	
8	8		61.44	2.5	
10	10		99	3.5	

Results of the stand studies of the design of the gas purifier and evaluation of its efficiency. A prototype separator with the productivity of $G = 2 - 10 \text{ m}^3/\text{h}$ was designed and manufactured for the studies. It is shown in Fig. 7. The results of the stand tests are presented in Table 2.

The data in Table 2 indicates that for the coagulator, the coefficient of the total efficiency of purification from oil droplets made up 99%. This coefficient is obtained with an input droplet concentration of up to $10 \text{ g}/\text{m}^3$, a gas flow rate ranging from 2 to $10 \text{ m}^3/\text{h}$ and the temperature of 20°C . At that, the aerodynamic drag of the separator was in the range of 0.2 to 3.5 kPa, and the outlet oil concentration in the purified air was up to $10 \text{ mg}/\text{m}^3$.

CONCLUSIONS. 1. There were performed calculations of the hydrodynamic situation and the trajectory of particles in the flow part of the oil separator of crankcase gases. They reveal that the particle flies through the entire channel in 0.2 s and its trajectory coincides with the line of gas medium flow in the operating channel. 2. Based on the results of static pressure distribution for $G = 2 - 10 \text{ m}^3/\text{h}$, it is established that the pressure drop in the separating coagulators reaches 0.2...3.5 kPa, respectively. 3. The results calculation at $G = 2 - 10 \text{ m}^3/\text{h}$ show that the total coefficient of separation efficiency reaches 99%. 4. Based on the calculations, a prototype oil separator was developed; 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 to be 99%.

Из табл. 2 видно, что для коагулятора коэффициент суммарной эффективности очистки от капель масла составил 99%. Данный коэффициент получен при входной концентрации капель до $10 \text{ г}/\text{м}^3$, расходе газа от 2 до $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ и при температуре 20°C . При этом аэродинамическое сопротивление отделителя колебалось от 0,2 до 3,5 кПа, а выходная концентрация масла в очищенном воздухе до $10 \text{ мг}/\text{м}^3$.

ВЫВОДЫ. 1. Выполнены расчеты гидродинамической обстановки и траектории частиц в проточной части сепаратора-маслоотделителя картерных газов, которые показали, что частица пролетает весь канал за 0,2 с и ее траектория совпадает с линией тока газовой среды в рабочем канале.

2. По результатам распределения статического давления для $G = 2 - 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ установлено, что перепад давления в сепарирующих коагуляторах достигает 0,2...3,5 кПа соответственно.

4. Результаты расчета при $G = 2 - 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ показали, что суммарный коэффициент улавливания составляет 99 %.

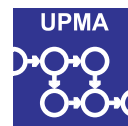
5. На основе расчетов был создан опытный образец маслоотделителя и были выполнены его экспериментальные исследования на стенде в виде аэродинамической трубы открытого типа. Определен коэффициент суммарной эффективности очистки, который равен 99%.

Список литературы

- [1] **Yong Wang.** Theoretical investigation of gas separation in functionalized nanoporous graphene membranes / Yong Wang, Qingyuan Yang, Chongli Zhong, Jinping Li // *Applied Surface Science*. — 2017. — vol. 407. — pp. 532–539.
- [2] **Trubyanov M.** Unsteady-state membrane gas separation by novel pulsed retentate mode for improved membrane module performance: Modelling and experimental verification / Trubyanov M., Drozdov P., Atlaskin A., Battalov S., Puzanov E., Vorotyntsev A., Petukhov A., Vorotyntsev V., Vorotyntsev I. // *Journal of Membrane Science*. — 2017. — vol. 530. — pp. 53–64.
- [3] **Kosyanchuk V.** Multiscale modeling of a gas separation device based on effect of thermal transpiration in the membrane / Kosyanchuk V., Kovalev V., Yakunchikov A. // *Separation and Purification Technology*. — 2017. — vol. 180. — pp. 58–68.
- [4] **Yan Yang.** CFD modeling of particle behavior in supersonic flows with strong swirls for gas separation / Yan Yang, Chuang Wen // *Separation and Purification Technology*. — 2017. — vol. 174. — pp. 22–28.
- [5] **Dongxiao Yang.** Suitability of cross-flow model for practical membrane gas separation processes / Dongxiao Yang, Haoyu Ren, Yaxiao Li, Zhi Wang // *Chemical Engineering Research and Design*. — 2017. — vol. 117. — pp. 376–381.
- [6] **Lingzi Wang.** Investigation on the oil–gas separation efficiency considering oil droplets breakup and collision in a swirling flow / Lingzi Wang, Jianmei Feng, Xiang Gao, Xueyuan Peng // *Chemical Engineering Research and Design*. — 2017. — vol. 117. — pp. 394–400.
- [7] **Long Han.** Integration optimisation of elevated pressure air separation unit with gas turbine in an IGCC power plant / Long Han, Guangyi Deng, Zheng Li, Qinhuai Wang, Klein E. Heleji // *Applied Thermal Engineering*. — 2017. — vol. 110. — 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-прикладный журнал*. — № 1. — 2006. — С. 67–75.
- [9] **Сербін С. І.** Експериментальні дослідження ефективності турбоімпаکتного 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 багатозфазних потоків у системах енергетичних установок [Текст] / С. С. Рижков // *Збірник наукових праць НУК*. — 2014. — № 3. — С. 69–76.
- [11] **А. С. N1071873 СССР.** Устройство для отделения жидкости от газа. Рыжков С.С.

© С. С. Рыжков

Статью рекомендует в печать
д-р экон. наук, проф. *Н. И. Радченко*



СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ

Кафедра управления проектами (УП) создана в 2007 г. приказом по Национальному университету кораблестроения имени адмирала Макарова от 23.01.07 № 44-к. Возглавил кафедру доктор технических наук, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заслуженный работник промышленности, профессор Чернов Сергей Константинович. Под его руководством на кафедре сегодня работают: д.т.н., профессор, лауреат государственной премии в области науки и техники К.В. Кошкин, д.э.н., профессор И.В. Гончаренко, к.т.н., профессор Н.В. Фатеев; кандидаты технических наук, доценты: А.М. Возный, Т.Г. Григорян, старшие преподаватели: Т.Т. Чубчик, Е.Б. Шнейдер, лаборант кафедры Колесниченко А.П., зав. кабинетом Дюкова С.П., зав. лабораторией Мастер И.В.

Сначала своего существования кафедра готовит специалистов и магистров дневной и заочной формы обучения по специальности «Управление проектами» на базе бакалаврата любого направления. В 2012 г. открыта новая специальность — «Управление инновационной деятельностью», по которой предусмотрена подготовка магистров дневной формы обучения. Всего за годы своего существования кафедрой подготовлено более 300 специалистов и магистров.

Кафедра также выполняет подготовку кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре. На сегодняшний день подготовлены 1 доктор и 8 кандидатов наук по специальности 05.13.22 «Управление проектами и программами». К защите готовятся еще 2 докторские и 9 кандидатских работ по этой специальности.

Для углубленного изучения основных дисциплин на кафедре используются лаборатории, оснащенные современной компьютерной и мультимедийной техникой, создана специализированная аудитория для лекционных и практических занятий, а также для проведения индивидуальной работы и факультативных занятий и семинаров. В 2007 г. создан филиал кафедры на базе ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», где изучаются дисциплины «Управление проектами машиностроительных предприятий», «Управление проектами развития предприятий», «Стратегическое управление инновационным развитием» и «Управление инновационными проектами».

На базе кафедры УП создан Николаевский центр Украинской ассоциации управления проектами (UPMA). Кафедра аккредитована UPMA для подготовки международных сертифицированных специалистов уровня E (IPMA 4 -LC).

Кафедра проводит активную научно-исследовательскую работу по тематическим направлениям

«Методология управления проектами и программами», «Информационные технологии управления проектами», «Управление проектами функционирования и развития наукоемких предприятий», «Управление проектами регионального развития».

Кафедрой УП ежегодно в сентябре проводится Международная научно-практическая конференция «Управление проектами: состояние и перспективы». Целью конференции является обмен научными достижениями и навыками практического использования методологий управления проектами, выявление перспективных направлений исследований и установление творческих связей между различными коллективами исследователей и практиков в этой области. В конференции принимают участие около 200 участников из разных городов Украины, а также из России, Беларуси, Азербайджана и Японии.

Ежегодно в ноябре преподаватели кафедры вместе со студентами и аспирантами проводят форум, посвященный Международному дню управления проектами, на который приглашаются ведущие ученые и практики. Форум посвящен практическим аспектам деятельности профессионалов по управлению проектами (проблемы, с которыми сталкиваются руководители проектов, лучшие украинские и мировые практики и т.д.).