

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-459-474>

УДК 532.539

Оценка эффективности процессов переноса в роторном аппарате

А. М. Волк¹⁾, А. И. Вилькоцкий¹⁾, О. Н. Пыжкова¹⁾

¹⁾Белорусский государственный технологический университет
(Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В статье рассматривается возможность применения вихревых аппаратов для межфазного взаимодействия при проведении различных физико-химических процессов в химической, пищевой, газодобывающей, строительной и других отраслях. В процессах массопередачи один или несколько распределяемых компонентов через активную поверхность их раздела переходят из одной фазы в другую. Для эффективного выполнения данных процессов в абсорберах, ректификаторах, адсорберах, экстракторах важное значение имеет развитая поверхность взаимодействующих фаз. Большинство химических реакций в реакционных аппаратах и гетерогенных средах происходят при подводе исходных распределяемых веществ в зону реакции и отводе образующихся продуктов из зоны химического взаимодействия через поверхность раздела фаз. Указанные процессы используются и при решении экологических проблем: для санитарной очистки вентиляционных газов, мокрой очистки выбросов. При выпарке, абсорбции, ректификации, мокрой очистке газов и других процессах актуальна задача предотвращения уноса капель жидкости с газовым потоком. Рассмотрена одна из конструкций роторного многоступенчатого массообменного аппарата, позволяющего достигать равномерного по высоте тонкодисперсного распыла жидкости при восходящем перекрестном движении газа. Приведены схемы установок для выполнения эксперимента. На основании экспериментальных исследований получена зависимость среднего диаметра капель диспергированной жидкости от геометрических и гидродинамических параметров. Описан дисперсный состав и приведены зависимости для определения основных характеристик, используемых в физико-химических процессах. Выполнен теоретический расчет движения частиц дисперсной фазы в рабочем объеме аппарата при разных расходах жидкости и газа. Теоретическими и экспериментальными методами произведена оценка уноса жидкой фазы, выполнен анализ процесса и даны практические рекомендации.

Ключевые слова: вихревые аппараты, физико-химические процессы, массопередача, абсорбция, ректификация, адсорбция, мокрая очистка, роторный аппарат, диспергирование жидкости, дисперсный состав, движение частиц, унос жидкости

Для цитирования: Волк, А. М. Оценка эффективности процессов переноса в роторном аппарате / А. М. Волк, А. И. Вилькоцкий, О. Н. Пыжкова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 5. С. 459–474. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-459-474>

Адрес для переписки

Волк Анатолий Матвеевич
Белорусский государственный
технологический университет
ул. Свердлова, 13а
220006, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 397-36-20
Anatoliyvolk@mail.ru

Address for correspondence

Volk Anatoly M.
Belarusian State
Technological University
13a, Sverdlov str.
220006, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 397-36-20
Anatoliyvolk@mail.ru

Evaluation of the Efficiency of Transfer Processes in a Rotary Apparatus

A. M. Volk¹⁾, A. I. Vilkotsky¹⁾, O. N. Pyzhcova¹⁾

¹⁾Belarusian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. This paper considers the possibility of using vortex devices for interphase interaction while carrying out various physical and chemical processes in the chemical, food, gas production, construction and other industries. In the processes of mass transfer, one or several distributed components perform the transition from one phase to another through the active surface of their interface. To perform the implementation of these processes in absorbers, rectifiers, adsorbers, extractors effectively, the developed surface of the interacting phases acquires a particular significance. Most of the chemical reactions in reaction devices and heterogeneous media occur when the initial distributed substances are supplied to the reaction zone and when the resulting products are removed from the chemical interaction zone through the phase interface. The processes under consideration are also used in solving environmental problems, viz. for sanitary cleaning of ventilation gases, wet cleaning of emissions. During evaporation, absorption, rectification, wet cleaning of gases and other processes, the problem of preventing the entrainment of liquid droplets with the gas flow is of great importance. One of the designs of a rotary multistage mass transfer apparatus is considered which makes it possible to achieve a finely dispersed liquid spray, uniform in height, with an ascending cross-flow of gas. The diagrams of installations for carrying out the experiment are given. On the basis of experimental studies, the dependence of the average diameter of dispersed liquid droplets on the geometric and hydrodynamic parameters has been obtained. The dispersed composition is described and dependences are given for determining the main characteristics used in physicochemical processes. The theoretical calculation of the movement of particles of the dispersed phase in the working volume of the apparatus at different flow rates of liquid and gas has been carried out. Theoretical and experimental methods were used to estimate the carryover of the liquid phase, an analysis of the process was carried out, and practical recommendations were given.

Keywords: vortex devices, physicochemical processes, mass transfer, absorption, rectification, adsorption, wet cleaning, rotary apparatus, liquid dispersion, dispersed composition, particle movement, liquid entrainment

For citation: Volk A. M., Vilkotsky A. I., Pyzhcova O. N. (2021) Evaluation of the Efficiency of Transfer Processes in a Rotary Apparatus. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (5), 459–474. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-459-474> (in Russian)

Введение

Вихревые аппараты широко применяются в химической, пищевой, газодобывающей, строительной и других отраслях для проведения различных физико-химических процессов, таких как разделение гетерогенных систем и тепломассообмен [1]. Циклонные камеры с вихревыми потоками характеризуются простотой конструкции и позволяют добиться высокой степени интенсивности тепло- и массообменных, сепарационных и других процессов [2]. Вихревые аппараты могут использоваться для: выпаривания нестойких к повышенным температурам и некристаллизующихся растворов большой вязкости; вакуумной ректификации жидких смесей, склонных к разложению при нагревании; проведения процессов экстракции. Одним из перспективных направлений применения роторных

аппаратов следует признать создание компактных установок с замкнутой системой очистки газовых выбросов от вредных компонентов, например при сжигании углеводородного топлива в камерах теплогенерирующих установок [3].

Эффективность явлений переноса в таких аппаратах [4, 5] обеспечивается высокими относительными скоростями взаимодействующих фаз, развитой поверхностью контакта, высокой интенсивностью процессов межфазного взаимодействия и существенно превосходит кинетические характеристики контактных устройств с традиционными способами взаимодействия фаз в системах, что способствует заметному уменьшению габаритов оборудования.

Вихревые аппараты характеризуются небольшим гидравлическим сопротивлением, малой металлоемкостью, внешним подводом энергии. Внедрение аппаратов в производство требует математического моделирования исследуемых процессов, сочетания теоретических и экспериментальных методов, относительной простоты расчетов.

Конструкция роторного массообменного аппарата

На основе анализа работы известных конструкций разработан многоступенчатый роторный аппарат [6], позволяющий в пределах ступени контакта благодаря вращению ротора достигать равномерного по высоте тонкодисперсного распыла жидкости при восходящем перекрестном движении газа. Устройство аппарата схематично изображено на рис. 1.

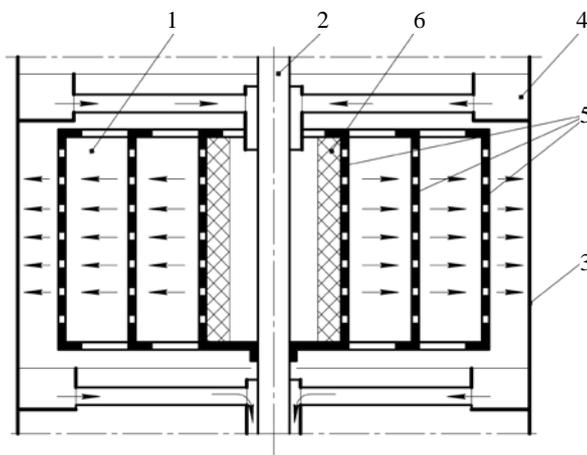


Рис. 1. Схема роторного массообменного аппарата: 1 – ротор; 2 – вал; 3 – корпус аппарата; 4 – переливное устройство; 5 – перфорированные цилиндры; 6 – перераспределительный элемент

Fig. 1. Diagram of a rotary mass transfer apparatus: 1 – rotor; 2 – shaft; 3 – body of the apparatus; 4 – overflow device; 5 – perforated cylinders; 6 – redistribution element

Ротор аппарата состоит из соосных перфорированных цилиндров, закреплен на валу в корпусе вместе с переливным устройством. Цилиндры ротора имеют отбортовку. Нижний торец внутреннего цилиндра заглушен.

Перераспределительный элемент в виде гофрированной сетки служит для равномерного распределения по высоте жидкой фазы.

При работе жидкость с вышележащей ступени контакта поступает по переливному устройству во внутренний перфорированный цилиндр. За счет механического воздействия перераспределительного элемента жидкости передается вращательное движение, и это приводит к быстрому выравниванию скоростей их вращения, причем наблюдается равномерное распределение толщины пленки по высоте цилиндра. Под действием центробежных сил происходят истечение жидкости из отверстий перфорации и ее диспергирование в пространстве между цилиндрами, где капли жидкости перемещаются в радиальном направлении и попадают на внутреннюю стенку элемента следующего цилиндра, после чего циклы повторяются соответственно числу цилиндров. При этом газ проходит в направлении оси аппарата, взаимодействуя с диспергированной жидкостью в пространстве между соседними цилиндрами и между внешним цилиндром и корпусом, а также с пленкой жидкости на внутренней поверхности цилиндров и корпуса.

Экспериментальные и теоретические исследования процессов массопереноса

Для разработки методики расчета аппарата важно установить зависимость дисперсного состава жидкой фазы от режимных и конструктивных параметров, а также функций распределения количества, поверхности, объема капель жидкости и характеристики этих распределений [7, 8]. С этой целью проведены экспериментальные исследования по изучению дисперсного состава жидкой фазы методом стробоскопического фотографирования по методике, предложенной в [9]. Также выполнены теоретические исследования. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

В опытах использовался полый цилиндрический стакан, жестко закрепленный на валу и предназначенный для диспергирования жидкой фазы (в рассматриваемом случае – воды). Подвод жидкости осуществлялся внутрь вращающегося стакана, отвод – через отверстие, выполненное на его боковой поверхности. Благодаря воздействию центробежных сил, возникающих при вращении, жидкость при выходе из отверстия диспергировалась и в виде капель отбрасывалась на стенку неподвижной обечайки.

Фотографирование капель проводилось при установившемся режиме истечения на разных участках между стаканом и обечайкой. При этом диаметр отверстия на стенке стакана изменялся в пределах 1,3–3,0 мм, частота вращения 1000–2300 об/мин, диаметр стакана 50 мм, диаметр наружного цилиндра 300 мм. Установлено (рис. 3), что средний диаметр диспергированных капель жидкости зависит от скорости вращения стакана, а также диаметра отверстия для оттока жидкости.

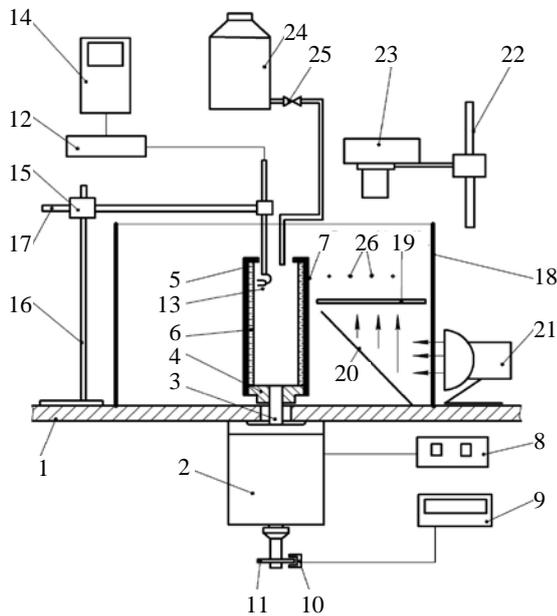


Рис. 2. Схема экспериментальной установки по изучению дисперсного состава жидкости:

- 1 – горизонтальная плита; 2 – электродвигатель; 3 – вал; 4 – ступица; 5 – цилиндр;
 6 – жидкостная пленка; 7 – отверстие; 8 – выпрямитель; 9 – тахометр;
 10 – фотоэлектрический датчик; 11 – диск датчика; 12 – измеритель газосодержания;
 13 – датчик; 14 – осциллограф; 15 – механизм перемещения датчика; 16 – штатив;
 17 – микрометр; 18 – цилиндрическая обечайка; 19 – матовое стекло; 20 – зеркало;
 21 – стробоскоп; 22 – штатив; 23 – фотоаппарат; 24 – емкость; 25 – вентиль;
 26 – капли диспергированной жидкости

Fig. 2. Diagram of the experimental installation for the study of the dispersed composition

- of a liquid: 1 – horizontal plate; 2 – electric motor; 3 – shaft; 4 – hub; 5 – cylinder;
 6 – liquid film; 7 – hole; 8 – straightener; 9 – tachometer;
 10 – photoelectric sensor; 11 – sensor disk; 12 – gas content meter;
 13 – sensor; 14 – oscilloscope; 15 – sensor movement mechanism; 16 – tripod;
 17 – micrometer; 18 – cylindrical shell; 19 – frosted glass; 20 – mirror; 21 – stroboscope;
 22 – tripod; 23 – camera; 24 – container; 25 – valve; 26 – drops of dispersed liquid

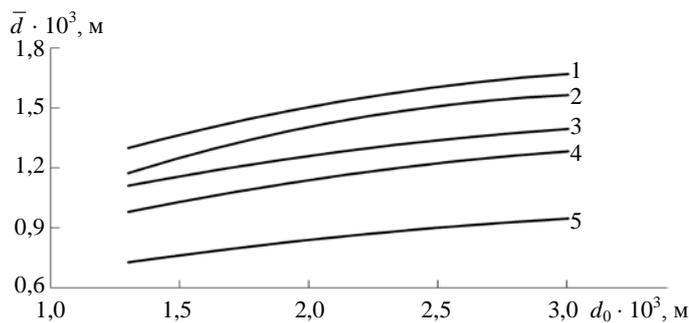


Рис. 3. Зависимость среднего диаметра диспергированных капель жидкости \bar{d} от диаметра отверстий в цилиндре d_0 : 1 – $n = 1000$ об/мин; 2 – 1300; 3 – 1600; 4 – 2000; 5 – $n = 2300$ об/мин

Fig. 3. Dependency of the average diameter of dispersed liquid droplets \bar{d} on the diameter of holes in the cylinder d_0 : 1 – $n = 1000$ rpm; 2 – 1300; 3 – 1600; 4 – 2000; 5 – $n = 2300$ rpm

Обработка большого количества экспериментальных данных показала, что зависимость среднего диаметра капель диспергированной жидкости от указанных параметров хорошо аппроксимируется выражением

$$\bar{d} = 0,089 \left(\frac{\pi n}{30} \right)^{-0,64} \left(\frac{d_0}{D_{\text{ц}}} \right)^{0,31}, \quad (1)$$

где \bar{d} – средний диаметр капель диспергированной жидкости, м; n – частота вращения диспергирующего цилиндра, об/мин; d_0 – диаметр отверстия в цилиндре, м; $D_{\text{ц}}$ – наружный диаметр диспергирующего цилиндра, м.

Погрешность аппроксимации составляет 6,4 %.

Дисперсный состав капель диспергируемой жидкости опишем обобщенным гамма-распределением [8], которое наиболее точно характеризует статистические распределения во всем диапазоне изменения размера частиц и инвариантно относительно величины порядка d^k .

Обобщенное гамма-распределение, рассмотренное в работе Стейси в 1962 г. [10], отличается универсальностью и широкой областью применения. Оно включает в себя гамма-распределение, его частные случаи, распределения Рэлея, Максвелла, Вейбулла, Леви, Хи-квадрат и другое и широко используется в прикладных задачах, связанных с расчетами инженерных рисков и рисков катастроф (землетрясений и наводнений), обработкой изображений и дистанционным зондированием, а также применяется в качестве описания дисперсного состава частиц дробления [11].

Рассмотрим функцию плотности распределения непрерывной неотрицательной случайной величины ξ в виде [8]

$$f(x; \beta, b, c) = \frac{|c|}{\beta \Gamma\left(\frac{b}{c}\right)} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{b-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^c\right), \quad x \geq 0, \quad b/c > 0, \quad (2)$$

где β – параметр масштаба; b, c – параметры формы.

Выполним переход к безразмерной случайной величине $\eta = \xi/\beta$

$$f(t; \beta, b, c) = \frac{|c|}{\beta \Gamma\left(\frac{b}{c}\right)} t^{b-1} \exp(-t^c). \quad (3)$$

Функция распределения непрерывной случайной величины η

$$F(t; \beta, b, c) = \frac{|c|}{\Gamma\left(\frac{b}{c}\right)} \int_0^t \tau^{b-1} \exp(-\tau^c) d\tau \quad (4)$$

сводится к неполной гамма-функции для $c > 0$ [12]

$$F(t; \beta, b, c) = \frac{1}{\Gamma\left(\frac{b}{c}\right)} \int_0^t z^{\frac{b}{c}-1} \exp(-z) dz = \frac{1}{\Gamma\left(\frac{b}{c}\right)} \gamma\left(\frac{b}{c}, t^c\right).$$

Для распределений (1)–(3) определены начальные моменты порядка ν , удовлетворяющего условию $(b + \nu) > 0$, причем:

$$\alpha_\nu(\eta) = \frac{\Gamma\left(\frac{b+\nu}{c}\right)}{\Gamma\left(\frac{b}{c}\right)}; \quad \alpha_\nu(\xi) = \beta^\nu \alpha_\nu(\eta) = \frac{\beta^\nu \Gamma\left(\frac{b+\nu}{c}\right)}{\Gamma\left(\frac{b}{c}\right)}.$$

Средние значения, используемые при оценке дисперсного состава среды и расчетах процессов взаимодействия фаз [13, 14], связаны с моментами распределения α_m выборки объема n соотношением

$$d_{ml}^{m-1} = \alpha_m(d) / \alpha_l(d) = \frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i^m}{\sum_{i=1}^n n_i d_i^l}.$$

Для распределения (1)–(3) приведенные средние значения диаметра частиц жидкости выражаются через гамма-функции

$$d_{ml} = \beta \left[\Gamma\left(\frac{b+m}{c}\right) / \Gamma\left(\frac{b+l}{c}\right) \right]^{1/(m-l)}. \quad (5)$$

Выполним статистическую оценку параметров распределения (1) методом наибольшего правдоподобия [15]. Пусть имеется некоторая выборка $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ генеральной совокупности обобщенного гамма-распределения. Рассмотрим функцию правдоподобия

$$L = \prod_{i=1}^n \frac{|c|}{\beta \Gamma\left(\frac{b}{c}\right)} \left(\frac{x_i}{\beta}\right)^{b-1} \exp\left\{-\left(\frac{x_i}{\beta}\right)^c\right\}. \quad (6)$$

Прологарифмируем данную функцию

$$\begin{aligned} L_n = \ln L &= \sum_{i=1}^n \left[\ln \frac{|c|}{\theta} - \ln \Gamma\left(\frac{b}{c}\right) + (b-1) \ln \frac{x_i}{\theta} - \left(\frac{x_i}{\theta}\right)^c \right] = \\ &= n \left[\ln \frac{|c|}{\beta} - \ln \Gamma\left(\frac{b}{c}\right) + (b-1) \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{x_i}{\beta} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\beta}\right)^c \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Находим частные производные функции (7):

$$\frac{\partial L_n}{\partial \beta} = -\frac{nb}{\beta} + \frac{c}{\beta} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\beta}\right)^c;$$

$$\frac{\partial L_n}{\partial b} = -\frac{n}{c} \psi\left(\frac{b}{c}\right) + \sum_{i=1}^n \ln \frac{x_i}{\beta};$$

$$\frac{\partial L_n}{\partial c} = \frac{n}{c} + \frac{nb}{c^2} \psi\left(\frac{b}{c}\right) - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\beta}\right)^c \ln \frac{x_i}{\beta}.$$

Приравнивая частные производные к нулю, получим систему уравнений для определения статистических оценок распределения (2):

$$-\frac{nb}{\beta} + \frac{c}{\beta} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\beta}\right)^c = 0; \quad (8)$$

$$\frac{n}{c} \psi\left(\frac{b}{c}\right) - \sum_{i=1}^n \ln \frac{x_i}{\beta} = 0; \quad (9)$$

$$\frac{n}{c} + \frac{nb}{c^2} \psi\left(\frac{b}{c}\right) - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\beta}\right)^c \ln \frac{x_i}{\beta} = 0. \quad (10)$$

Решение уравнений (8)–(10) дает статистическую оценку параметров распределения (2). Данные оценки будут состоятельными, асимптотически несмещенными и асимптотически эффективными [15]. При условии эффективности оценок система (8)–(10) имеет единственное решение.

Решением системы (8)–(10) для экспериментальных данных найдены следующие значения параметров: $\beta = 0,84$; $c = 4,5$; $b = 2,5$.

Функция распределения величины порядка d^k имеет вид

$$F_k(t; \beta, b, c) = \frac{|c|}{\Gamma\left(\frac{b+k}{c}\right)} \int_0^t x^{b+k-1} \exp(-x^c) dx. \quad (11)$$

Параметр $t = d/\beta$ является приведенным.

При $k = 3$ получаем функцию распределения объемов частиц жидкости, диспергируемой вращающимся ротором:

$$F_3(d) = 4,93 \int_0^{d/\bar{d}} x^{4,5} \exp(-x^{4,5}) dx. \quad (12)$$

Средние значения диаметра частиц жидкости вычисляются по (5).

Полученные результаты позволяют в зависимости от нагрузок по газовой фазе, геометрических параметров роторных аппаратов, режимов их работы рассчитать дисперсный состав частиц жидкости, оценить допустимую величину уноса. Кроме того, зная дисперсный состав жидкой фазы, можно рассчитать величину межфазной поверхности и, следовательно,

определить тепломассообменные характеристики роторных и других диспергирующих аппаратов.

Для проверки теоретических расчетов и определения гидравлического сопротивления конструкции выполнены экспериментальные исследования по методике, разработанной в [9]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.

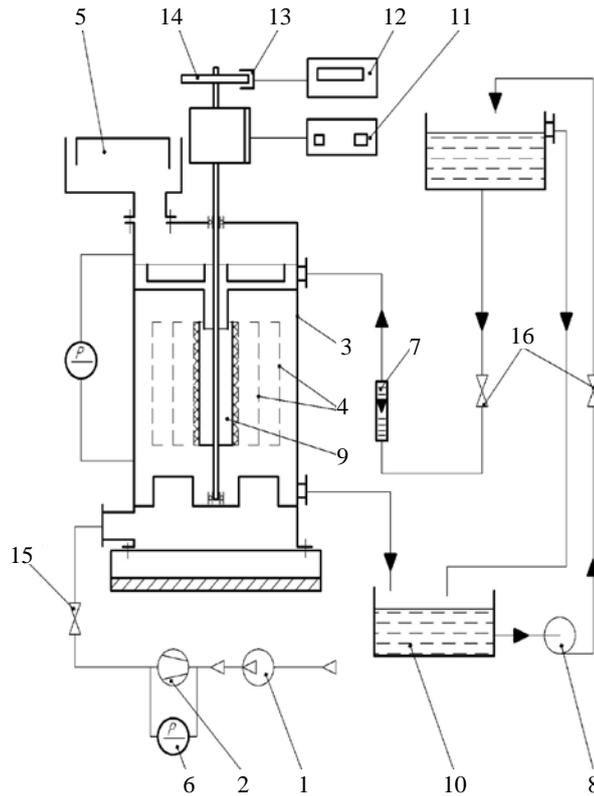


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для проверки теоретических расчетов:

- 1 – газодувка; 2 – измерительная диафрагма; 3 – корпус аппарата;
- 4 – перфорированные цилиндры; 5 – брызгоуловитель; 6 – U-образный манометр;
- 7 – ротаметр; 8 – насос; 9 – стакан; 10 – емкость; 11 – выпрямитель; 12 – тонометр;
- 13 – фотоэлектрический датчик; 14 – диск; 15 – задвижка; 16 – вентиль

Fig. 4. Diagram of the experimental installation to check the theoretical calculations:

- 1 – gas blower; 2 – measuring diaphragm; 3 – body of the apparatus;
- 4 – perforated cylinders; 5 – spray trap; 6 – U-shaped manometer; 7 – rotameter; 8 – pump; 9 – barrel;
- 10 – container; 11 – straightener; 12 – tonometer; 13 – photoelectric sensor; 14 – disk; 15 – gate valve; 16 – valve

С помощью газодувки через измерительную диафрагму газовый поток поступает в корпус аппарата. Жидкая фаза диспергируется вращающимися перфорированными цилиндрами. Мелкие капли увлекаются потоком воздуха, и в брызгоуловителе происходит их сепарация. Величина относительного уноса определялась по количеству уловленной жидкости. Для измерения гидравлического сопротивления применялся U-образный манометр.

Конструкция ротора представляла собой соосно установленные цилиндры высотой 160 мм каждый и диаметрами 50, 130 и 210 мм. Суммарная площадь отверстий, расположенных в шахматном порядке, $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ на каждом цилиндре. Диаметр отверстий 1,5 мм.

Опыты проводились на системе «вода – воздух» в пределах изменения следующих параметров: плотность орошения $q = (0,5-15,0) \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; скорость газа по сечению аппарата $w_z = (0-5) \text{ м/с}$; число оборотов ротора $n = (500-2000) \text{ об/мин}$; плотность частиц $\rho_{\text{ж}} = (800-1400) \text{ кг/м}^3$.

Задачей диспергирования жидкости в роторном аппарате является равномерное орошение цилиндров и отсутствие ее уноса из корпуса. Анализ уноса частиц диспергированной жидкой фазы в роторном аппарате можно выполнить при оценке траектории движения частиц жидкости в пространстве между цилиндрами.

Рассмотрим равномерное вращательное движение ротора с постоянной угловой скоростью ω . Движение частиц в закрученном газовом потоке исследовано в [16, 17] и описывается системой дифференциальных уравнений в цилиндрической системе координат.

Изучим движение одиночной частицы диаметром d и массой m в цилиндрической системе координат r, φ, z . Ось z цилиндрической системы координат направим вверх по оси аппарата. Будем считать, что капли имеют шарообразную форму. Масса частицы

$$m = \rho_{\text{ж}} \frac{1}{6} \pi d^3. \quad (13)$$

Пусть v_r, v_φ, v_z – радиальная, касательная и осевая составляющие скорости движущейся частицы соответственно. Уравнения движения одиночной частицы имеют вид [16, 17]:

$$\begin{cases} m \left(\frac{dv_r}{dt} - \frac{v_\varphi^2}{r} \right) = F_r; \\ m \left(\frac{dv_\varphi}{dt} + 2 \frac{v_\varphi v_r}{r} \right) = F_\varphi; \\ m \frac{dv_z}{dt} = -F_g + F_z, \end{cases} \quad (14)$$

где $\vec{F}_g = mg$ – сила тяжести; F_r, F_φ, F_z – составляющие силы гидродинамического воздействия $\vec{F} = \zeta \frac{1}{2} \rho |\vec{w} - \vec{v}| (\vec{w} - \vec{v}) \pi \frac{d^2}{4}$ (остальные силы как минимум на порядок меньше, и ими можно пренебречь [18, 19]).

Коэффициент сопротивления сферической частицы зависит от числа Рейнольдса [18]

$$\text{Re}_d = \frac{d|\bar{w} - \bar{v}|}{\nu}. \quad (15)$$

При движении частицы в вязкой среде наблюдаются ламинарный, переходной турбулентный и турбулентный режимы обтекания частицы. Коэффициент сопротивления соответственно определяется следующими зависимостями:

$$\zeta = \begin{cases} 24 \text{Re}_d^{-1}, & \text{Re}_d < 2; \\ 18,5 \text{Re}_d^{-0,6}, & 2 \leq \text{Re}_d \leq 500; \\ 0,44, & \text{Re}_d > 500. \end{cases} \quad (16)$$

При орошении цилиндров жидкостью их поверхность будет непроницаемой для газа, $w_r = 0$. Осевую скорость w_z газового потока считаем распределенной равномерно по оси цилиндров.

Касательная составляющая скорости w_ϕ газового потока в зависимости от текущего радиуса r в пространстве между вращающимися непроницаемыми цилиндрами описывается зависимостью [20]

$$w_\phi(r) = \frac{\omega_2 R_2^2 - \omega_1 R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} r - \frac{(\omega_2 - \omega_1) R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{r}, \quad (17)$$

где ω_1, ω_2 – угловая скорость вращения цилиндров; R_1, R_2 – радиус внутреннего и внешнего цилиндров.

При неподвижном внешнем цилиндре (корпусе аппарата) принимаем $\omega_1 = \omega, \omega_2 = 0$. Тогда зависимость (17) имеет вид

$$w_\phi(r) = \frac{\omega R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_2^2}{r} - r \right). \quad (18)$$

Если цилиндры вращаются с одинаковой угловой скоростью $\omega = \omega_1 = \omega_2$, в пространстве между ними вращение газа происходит по закону твердого тела

$$w_\phi(r) = \omega r. \quad (19)$$

Для решения составленной системы необходимо задать начальные условия. В начальный момент времени $t = 0$ касательную скорость частицы принимаем равной линейной скорости диспергирующего цилиндра $v_\phi = \omega R_1$. Радиальную скорость частицы при $r = R_1$ зададим в пределах $v_r = (0-5)$ м/с. Диаметр частиц принимаем $d = (0,1 \cdot 10^{-3}) - (3 \cdot 10^{-3})$ м.

При анализе траектории движения оценим отклонение z от горизонтальной плоскости частиц различного диаметра d в зависимости от текущего радиуса r в пространстве между цилиндрами (рис. 5).

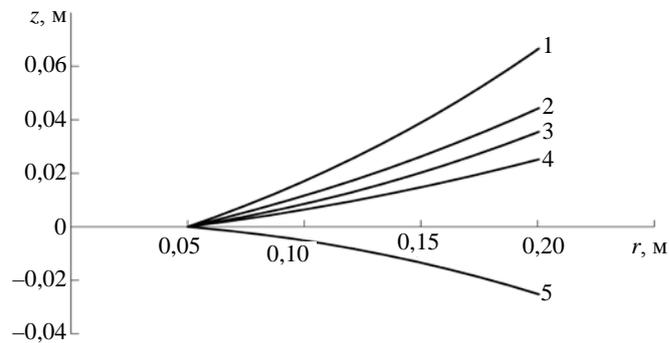


Рис. 5. Траектории движения частиц жидкости в вертикальной плоскости:
 1 – $w_z = 3$ м/с, $n = 960$ об/мин, $d = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – 5, 960, $0,5 \cdot 10^{-3}$; 3 – 3, 960, $0,5 \cdot 10^{-3}$;
 4 – 5, 960, $0,7 \cdot 10^{-3}$; 5 – $w_z = 0$, $n = 480$ об/мин, $d = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м

Fig. 5. Trajectories of motion of liquid particles in the vertical plane:
 1 – $w_z = 3$ m/s, $n = 960$ rpm, $d = 0,3 \cdot 10^{-3}$ m; 2 – 5, 960, $0,5 \cdot 10^{-3}$; 3 – 3, 960, $0,5 \cdot 10^{-3}$;
 4 – 5, 960, $0,7 \cdot 10^{-3}$; 5 – $w_z = 0$, $n = 480$ rpm, $d = 0,1 \cdot 10^{-3}$ m

Анализ расчетов свидетельствует о том, что изменение плотности частицы в этих пределах не оказывает существенного влияния на изменение траектории ее движения. Высота подъема частицы уменьшается при увеличении частоты вращения ротора, так как повышаются ее начальные касательная и радиальная составляющие скорости. Время движения от стенки до стенки сокращается. Возрастание газовых нагрузок увеличивает высоту подъема частиц, мелкие частицы при этом уносятся газовым потоком. Режимы работы аппарата необходимо выбирать таким образом, чтобы траектории движения частиц имели минимальное отклонение от горизонтальной плоскости. При отклонении частиц вниз нарушается равномерность орошения цилиндров, а при отклонении вверх увеличивается унос. В обоих случаях эффективность процессов массопереноса снижается.

Обобщение выполненных расчетов при заданной нулевой радиальной скорости газового потока ($w_r = 0$) и нулевом начальном значении радиальной составляющей скорости частицы ($v_r = 0$) дало возможность получить расчетную осевую скорость газового потока, при которой достигается равномерное орошение цилиндров:

$$w_z = 3,96 \cdot 10^5 d^{2,1} (\omega R_1)^{0,5} (R_2 - R_1)^{-1,1}. \quad (20)$$

Экспериментальные результаты уноса жидкости представлены на рис. 6–8.

Из полученных результатов следует, что величина уноса жидкости растет с увеличением числа оборотов ротора и скорости газа и снижается при увеличении плотности орошения. Это значит, что основную долю составляет вторичный унос.

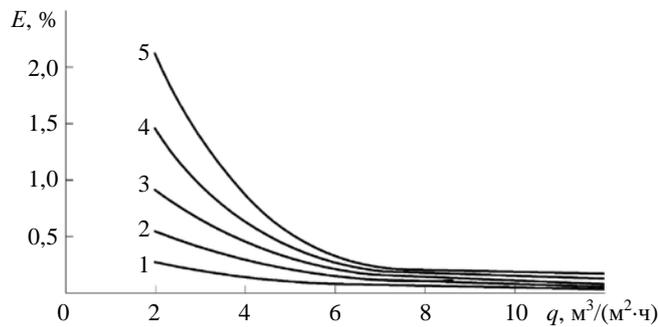


Рис. 6. Влияние плотности орошения q на величину уноса жидкой фазы E при $w_z = 2$ м/с: 1 – $n = 700$ об/мин; 2 – 1000; 3 – 1300; 4 – 1600; 5 – $n = 1800$ об/мин

Fig. 6. Influence of the density of irrigation q on the amount of entrainment of the liquid phase E at $w_z = 2$ m/s: 1 – $n = 700$ rpm; 2 – 1000; 3 – 1300; 4 – 1600; 5 – $n = 1800$ rpm

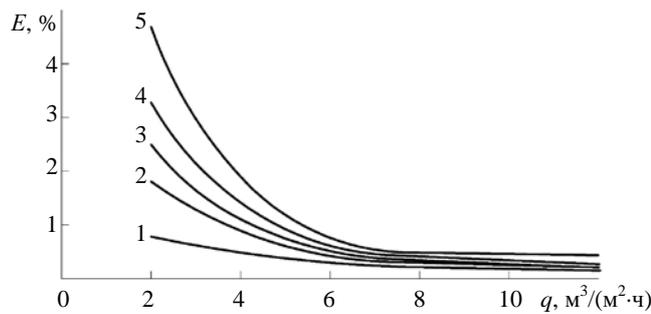


Рис. 7. Влияние плотности орошения q на величину уноса жидкой фазы E при $w_z = 3$ м/с: 1 – $n = 700$ об/мин; 2 – 1000; 3 – 1300; 4 – 1600; 5 – $n = 1800$ об/мин

Fig. 7. Influence of the density of irrigation q on the amount of entrainment of the liquid phase E at $w_z = 3$ m/s: 1 – $n = 700$ rpm; 2 – 1000; 3 – 1300; 4 – 1600; 5 – $n = 1800$ rpm

При повышении плотности орошения увеличивается толщина пленки жидкости на внутренних поверхностях цилиндров, и капли, достигшие стенки, поглощаются пленкой. Резкое снижение уноса наблюдается при плотности орошения $q > 6$ м³/(м²·ч). При этом характер зависимостей аналогичен для разных скоростей газа. Обработкой экспериментальных данных получена зависимость величины уноса жидкости от основных режимных параметров

$$E = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{Re}_r^{2,61} q^{-1,46} n^{1,82}, \quad (21)$$

где $\text{Re}_r = w_z D \rho_r / \mu_r$ – число Рейнольдса; D – внутренний диаметр корпуса аппарата, м; μ_r – коэффициент динамической вязкости газа, Па·с.

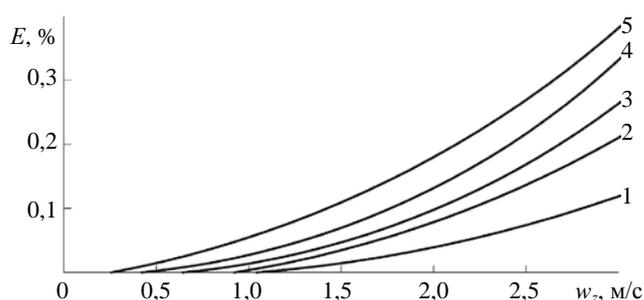


Рис. 8. Влияние скорости газового потока w_z на величину уноса жидкой фазы E при $q = 11,03 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$: 1 – $n = 700$ об/мин; 2 – 1000; 3 – 1300; 4 – 1600; 5 – $n = 1800$ об/мин

Fig. 8. Influence of the gas flow rate w_z on the amount of entrainment of the liquid phase E at $q = 11,03 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$: 1 – $n = 700$ rpm; 2 – 1000; 3 – 1300; 4 – 1600; 5 – $n = 1800$ rpm

Аналитический расчет величины уноса жидкости, выполненный решением системы (14), оценка объема жидкости по функции распределения (12) с учетом (1) показывают, что расчетные и экспериментальные значения достаточно близки при плотности орошения $q \geq 6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Например, при частоте вращения ротора $n = 1000$ об/мин, диаметре отверстий $d_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ м и диаметре диспергирующего цилиндра $D_{\text{ц}} = 0,21$ м средний диаметр капели, рассчитанный по (1), равен $1,07 \cdot 10^{-3}$ м. При осевой скорости газа $w_z = 2$ м/с решение системы (14) и оценка (12) показывают, что уносятся будут капли диаметром менее $(0,4-0,5) \cdot 10^{-3}$ м. Величина уноса, определенная по (21), составляет 0,7–0,8 %. Данные значения соответствуют результатам опыта. Расхождение расчетных и опытных значений при плотности орошения $q < 6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ свидетельствует о вторичном уносе.

Измерение гидравлического сопротивления роторного аппарата в диапазоне изменения рассмотренных параметров дает низкие значения, не превышающие 500 Па, поэтому они в статье не приводятся.

ВЫВОДЫ

1. Вихревые аппараты позволяют существенно интенсифицировать процесс межфазного массообмена, создать гидродинамические режимы с достаточно высокими относительными скоростями частиц и несущей среды, значительными центробежными ускорениями. Пленочные и вихревые аппараты характеризуются также развитой поверхностью контакта фаз.

2. Разработанный метод определения дисперсности, исследование механизма и закономерностей диспергирования и взаимодействия фаз в роторном аппарате позволяют определить нагрузки по фазам, режимы работы, обеспечить равномерное орошение поверхностей частиц жидкой фазы, минимальный унос жидкости и наименьшее гидравлическое сопротивление аппарата.

3. Выполненные исследования могут применяться при разработке конструкций вихревых аппаратов и исследовании процессов межфазного взаимодействия в аналогичных конструкциях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутепов, А. М. Вихревые процессы для модификации дисперсных систем / А. М. Кутепов, А. С. Латкин. М.: Наука, 1992. 250 с.
2. Сабуров, Э. Н. Аэродинамика и устойчивость потока в относительно длинных циклонных камерах / Э. Н. Сабуров, Д. А. Онохин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 527–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-527-538>.
3. Yarmolchick, Yu. P. (2019) Formation Mechanisms and Methods for Calculating Pollutant Emissions from Natural Gas Combustion Depending on the Burner Emission Class / Yu. P. Yarmolchick // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 6. С. 565–582. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-565-582>.
4. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / В. М. Олевский [и др.]; под общ. ред. В. М. Олевского. М.: Химия, 1988. 240 с.
5. Кафаров, В. А. Анализ и синтез химико-технологических систем / В. А. Кафаров, В. М. Мешалкин. М.: Химия, 1991. 431 с.
6. Роторный массообменный аппарат вентиляторного типа: пат. 2605 Респ. Беларусь, МКИ⁵ В 01D 3/30 / В. А. Марков, А. И. Ершов, А. А. Боровик, А. М. Волк. Опубл. 30.12.1998.
7. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов. 3-е изд., перераб. Л.: Химия, 1987. 264 с.
8. Волк, А. М. Статистическая оценка параметров обобщенного гамма-распределения / А. М. Волк // Труды БГТУ, Физ.-мат. науки и информатика. 2016. № 6. С. 10–13.
9. Марков, В. А. Разделение фаз в теплообменных аппаратах / В. А. Марков. Минск, 1996. 333 с.
10. Stacy, E. W. A Generalization of the Gamma Distribution / E. W. Stacy // Ann. Math. Statistics. 1962. Vol. 33, Iss. 3. P. 1187–1192.
11. Королев, В. Ю. Устойчивость конечных смесей обобщенных гамма-распределений относительно возмущений параметров / В. Ю. Королев, В. А. Крылов, В. Ю. Кузьмин // Информатика и ее применения. 2011. Т. 5, Вып. 1. С. 31–38.
12. Янке, Е. Специальные функции: формулы, графики, таблицы / Е. Янке, Ф. Эмдэ, Ф. Леш. М.: Наука, 1977. 458 с.
13. Дитякин, Ю. Ф. Распыливание жидкостей / Ю. Ф. Дитякин, Л. А. Клячко. М.: Машиностроение, 1977. 206 с.
14. Лышевский, А. С. Процессы распыливания топлива дизельными форсунками / А. С. Лышевский. М.: Машгиз, 1963. 180 с.
15. Крамер, Г. Математические методы статистики: Основы моделирования и первичная обработка данных / Г. Крамер. М.: Мир, 1975. 648 с.
16. Волк, А. М. Движение твердых частиц в закрученном потоке / А. М. Волк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2009. № 3. С. 77–81.
17. Волк, А. М. Тонкодисперсная сепарация жидкости / А. М. Волк // Труды БГТУ. Физ.-мат. науки и информатика. 2020. Т. 236, № 2. С. 31–36.
18. Соу, С. Гидродинамика многофазных систем / С. Соу. М.: Мир, 1971. 536 с.
19. Медников, Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей / Е. П. Медников. М.: Наука, 1980. 176 с.
20. Волк, А. М. Течение вязкой жидкости в пространстве между движущимися проницаемыми поверхностями / А. М. Волк // Инженерно-физический журнал. 1993. Т. 65, № 2. С. 152–158.

REFERENCES

1. Kutepov A. M., Latkin A. S. (1992) *Vortical Processes for Modification of Dispersed Systems*. Moscow, Nauka Publ. 250 (in Russian).
2. Saburov E. N., Onokhin D. A. (2018) Aerodynamics and Stability of the Flow in Relatively Long Cyclone Chambers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 527–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-527-538> (in Russian).
3. Yarmolchick Yu. P. (2019) Formation Mechanisms and Methods for Calculating Pollutant Emissions from Natural Gas Combustion Depending on the Burner Emission Class. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (6), 565–582. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-565-582> (in Russian).
4. Olevsky V. M., Ruchinsky V. R., Kashnikov A. M., Chernyshev V. I. (1988) *Film Heat and Mass Transfer Equipment (Processes and Apparatuses of Chemical and Petrochemical Technology)*. Moscow, Khimiya Publ. 240 (in Russian).
5. Kafarov V. A., Meshalkin V. M. (1991) *Analysis and Synthesis of Chemical-Technological Systems*. Moscow, Khimiya Publ. 431 (in Russian).
6. Markov V. A., Yershov A. I., Borovik A. A., Volk A. M. (1998) *Rotary Mass Transfer Device of a Ventilator Type*. Patent No 2605 Republic of Belarus (in Russian).
7. Kouzov P. A. (1987) *Fundamentals of Analysis of the Dispersed Composition of Industrial Dust and Crushed Materials*. 3rd ed. Leningrad, Khimiya Publ. 264 (in Russian).
8. Volk A. M. (2016) Statistical Evaluation of the Parameters of the Generalized Gamma Distribution. *Trudy BGTU. Fiziko-Matematicheskie Nauki i Informatika = Proceedings of BSTU. Physics and Mathematics, Informatics*, (6), 10–13 (in Russian).
9. Markov V. A. (1996) *Phase Separation in Heat and Mass Transfer Apparatuses*. Minsk. 333 (in Russian).
10. Stacy E. W. (1962) A Generalization of the Gamma Distribution. *Annals of Mathematical Statistics*, 33 (3), 1187–1192. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177704481>.
11. Korolev V. Yu., Krylov V. A., Kuz'min V. Yu. (2011) Stability of Finite Mixtures of Generalized Gamma Distributions with Respect to Parameter Perturbations. *Informatika i ee Primeneniya = Informatics and Applications*, 5 (1), 31–38 (in Russian).
12. Janke E., Emde F., Lesh F. (1977) *Special Functions: Formulae, Diagrams, Tables*. Moscow, Nauka Publ. 458 (in Russian).
13. Dityakin Yu. F., Klyachko L. A. (1977) *Atomization of Liquids*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 206 (in Russian).
14. Lyshevsky A. S. (1963.) *Processes of Fuel Atomization by Diesel Injectors*. Moscow, Mashgiz Publ. 180 (in Russian).
15. Cramer H. (1975) *Mathematical Methods of Statistics: Fundamentals of Modeling and Primary Data Processing*. Moscow, Mir Publ. 648 (in Russian).
16. Volk A. M. (2009) Motion of Solid Particles in a Swirling Stream. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 77–81 (in Russian).
17. Volk A. M. (2020) Fine-Dispersed Liquid Separation. *Trudy BGTU. Fiziko-Matematicheskie Nauki i Informatika = Proceedings of BSTU. Physics and Mathematics, Informatics*, 236 (2), 31–36 (in Russian).
18. Sow S. (1971) *Hydrodynamics of Multiphase Systems*. New York, Wiley Publ. 533 (in Russian).
19. Mednikov E. P. (1980) *Turbulent Transport and Deposition of Aerosols*. Moscow, Nauka Publ. 176 (in Russian).
20. Volk A. M. (1993) Flow of a Viscous Liquid Between Moving Permeable Surfaces. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 65, (2), 734–739. <https://doi.org/10.1007/BF00861534>.

Received: 18 May 2021

Accepted: 23 July 2021

Published online: 30 September 2021