

И. Н. Мадышев, О. С. Дмитриева, А. О. Маясова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТНОГО УСТРОЙСТВА ВИХРЕВОГО ТИПА

*Ключевые слова:* вихревое контактное устройство, гидродинамические характеристики, пленка жидкости, двухфазный поток, коэффициент сопротивления, коэффициент крутки.

Эффективность работы теплообменного и смесительного оборудования в значительной степени определяется технологическими характеристиками и геометрическими характеристиками контактных устройств. Важным направлением ускорения процессов тепло- и массообмена является создание внутри оборудования областей усиленного смешения сред, реализующегося за счет введения интенсивных закрученных течений. Разработано контактное устройство вихревого типа для теплообменных аппаратов, работающих в системе газ-жидкость, взаимодействие фаз в которых осуществляется в закрученном потоке. Целью исследования является определение гидродинамических характеристик разработанного контактного устройства вихревого типа от режимных условий при одновременном изменении коэффициента сопротивления отверстий и параметров крутки потока. В работе представлены результаты исследования гидродинамических характеристик контактного устройства вихревого типа для интенсификации теплообменных процессов. Экспериментальные исследования проведены на лабораторной установке на системе воздух-вода. В ходе работы был проанализирован эффект изменения коэффициента аэродинамического сопротивления отверстий  $\xi_0$ , относительного расхода фаз  $L_m/G_m$  и уровня крутки газа на параметры движения жидкости – ее скорость внутри сопел и параметр толщины образующейся пленки. Полученные данные свидетельствуют о том, что ключевыми факторами, определяющими гидродинамику в отверстиях разделителя, выступают степень закрутки газовой струи, начальная скорость газа и сопротивляемость отверстий. Выявлена прямая корреляция между скоростью подачи жидкости и коэффициентом сопротивления: рост  $\xi_0$  приводит к возрастанию энергопотерь в диапазоне 85–95%. Определен диапазон устойчивой работы контактного устройства вихревого типа, при котором толщина пленки составляет 0,46–0,6 мм. При соотношении  $L_m/G_m > 3$  рост уноса капель значительный, что делает режим работы нецелесообразным. Кроме того, установлено, что интенсификация крутки потока всегда повышает скорость движения жидкости в сепараторных отверстиях, независимо от уровня удельной нагрузки по фазам ( $L_m/G_m$ ). Полученные результаты позволяют совершенствовать конструкции теплообменного оборудования.

I. N. Madyshev, O. S. Dmitrieva, A. O. Mayasova

## INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A VORTEX TYPE CONTACT DEVICE

*Keywords:* vortex contact device, hydrodynamic characteristics, liquid film, two-phase flow, resistance coefficient, twist coefficient.

The efficiency of heat and mass transfer and mixing equipment is largely determined by the technological and geometric characteristics of contact devices. An important direction for accelerating heat and mass transfer processes is the creation of zones of enhanced mixing within the equipment, achieved through the introduction of intensive swirling flows. A vortex-type contact device has been developed for heat and mass transfer apparatus operating in a gas-liquid system, where phase interaction occurs in a swirling flow. The aim of the study is to determine the hydrodynamic characteristics of the developed vortex-type contact device under various operating conditions, with simultaneous changes in the resistance coefficient of the orifices and the swirl parameters of the flow. The paper presents the results of a study of the hydrodynamic characteristics of the vortex-type contact device for intensifying heat and mass transfer processes. Experimental studies were conducted on a laboratory setup using an air-water system. During the study, the effect of changes in the aerodynamic resistance coefficient of the orifices ( $\xi_0$ ), the relative phase flow rate ( $L_m/G_m$ ), and the gas swirl level on the liquid movement parameters – its velocity inside the nozzles and the thickness of the resulting film – was analyzed. The obtained data indicate that the key factors determining the hydrodynamics in the separator orifices are the degree of gas jet swirl, the initial gas velocity, and the resistance of the orifices. A direct correlation was found between the liquid feed rate and the resistance coefficient: an increase in  $\xi_0$  leads to an increase in energy losses in the range of 85–95%. The range of stable operation of the vortex-type contact device was determined, with the film thickness ranging from 0.46 to 0.6 mm. At a ratio of  $L_m/G_m > 3$ , the increase in droplet carryover is significant, making the operating mode impractical. Additionally, it was established that intensification of flow swirl always increases the liquid velocity in the separator orifices, regardless of the specific phase load level ( $L_m/G_m$ ). The obtained results enable the improvement of heat and mass transfer equipment designs.

### Введение

Качество взаимодействия межфазных сред (жидкая и газовая) является критическим фактором эффективности аппаратов для массо-, теплообмена и смешения. Именно от степени контакта зависит результативность технологических операций, таких как абсорбция, ректификация, очистка и другие процессы разделения. [1]. Исследователи разработали

множество конструкций контактных устройств и добились хороших результатов в их промышленном применении – решетчатые тарелки провального типа, клапанные, переливные, барботажные и др. [2, 3]. Геометрические характеристики контактных устройств играют ключевую роль в определении эффективности тепло- и массопередачи. Течение жидкостной пленки по поверхности контактных устройств имеет свои особенности [4]. Чрезмерно

толстые пленки увеличивают термическое сопротивление и снижают эффективность теплопередачи, тогда как слишком тонкие пленки могут приводить к недостаточной смачиваемости поверхности и высыханию пленки. Поэтому точное понимание характеристик распределения жидкости имеет решающее значение для совершенствования конструкции теплообменного оборудования с целью повышения теплообменных характеристик [5, 6]. Многочисленные исследования, как экспериментальные, так и численные, показывают, что минимальная толщина пленки обычно достигается в определенном диапазоне углов контакта и существенно зависит от совокупного воздействия возмущений на входе, структурных конфигураций контактных устройств и смачиваемости поверхности [7–9].

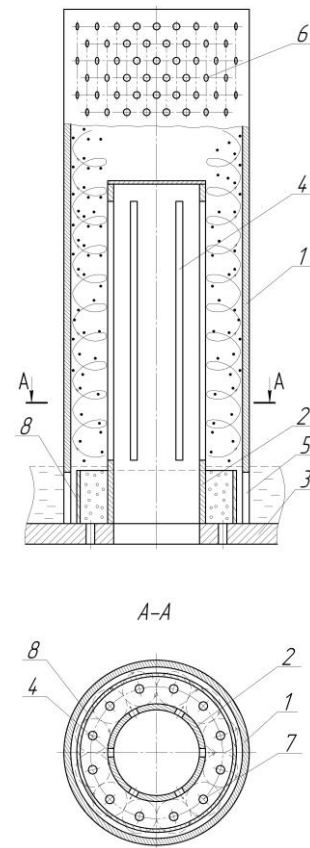
Использование стандартных конструкций теплообменных контактных устройств часто сопряжено с неоптимальными режимами проведения процессов, что ведет к росту энергопотребления и/или недостаточной степени разделения [10, 11]. Переход на устройства вихревого принципа действия позволяет достичь ряда преимуществ: увеличить единичную мощность установки, сократить занимаемые аппаратом объемы, а также существенно ускорить физические процессы благодаря формированию развитой площади соприкосновения сред [12, 13]. Так, например, в работе [14] представлены результаты исследования вихревых контактных устройств с кольцевыми каналами, для которых величина межфазной поверхности в жидкости составляет  $400\text{--}1000\text{ м}^{-1}$ , что в 3 раза выше по сравнению с колпачковыми устройствами. В работе [15] определены гидравлические потери в канале полого вихревого аппарата и в завихрителях при прямоточном нисходящем движении газа и газожидкостного потока. Исследования демонстрируют, что перепад давления не превышает сопротивления высокоэффективных циклонов и аппаратов вихревого типа других конструкций. Тем не менее, ряд исследований [16] фиксирует существенные ограничения внедрения вихревых аппаратов. К основным проблемам относятся захват капель жидкости потоком газа (унос капельной жидкости), неравномерность распределения фаз по рабочим зонам, сложность стабилизации равновесного состояния системы газ–жидкость, а также значительное увеличение гидравлического сопротивления аппаратуры.

Как видим, эффективная конструкция крайне важна, а характер течения в контактном устройстве играет значительную роль при оценке его эффективности. Несмотря на наличие работ по исследованию гидродинамических характеристик контактного устройства. В связи с этим, целью исследования является определение гидродинамических характеристик нового вихревого контактного устройства от режимных условий при одновременном изменении коэффициента сопротивления отверстий и параметров крутки потока.

### Методика исследования

Исследовалась работа контактного прямоточного устройства вихревого типа (рис. 1), разработанное на

основе устройства [17]. Конструктивные размеры исследуемого аппарата следующие: диаметр внешнего и внутреннего цилиндра 98 мм и 67 мм соответственно, высота отверстий 16 мм, форма отверстий – прямоугольная, количество отверстий – 8. Устройство представляет собой два коаксиальных цилиндра 1 и 2 (рис. 1), в зазоре между которыми образуется вихревой дисперсно-кольцевой газожидкостный поток. Это достигается за счет отрыва потока газа с кромок прямоугольных отверстий 4 при прохождении через них газового потока в межцилиндрическое пространство и последующего его контакта с жидкостью, которая диспергируется при прохождении газа через слой жидкости на полотне 3 через выполненные отверстия 7. Жидкость на полотно 3 поступает через отверстия 5. Гидрозатвор 8 служит для исключения прохода газа напрямую через отверстия 5. Восходящий вихревой дисперсно-кольцевой газожидкостный поток достигая верхней части контактного устройства сепарируется при прохождении пленки жидкости через отверстия 6 сепарационной части аппарата.



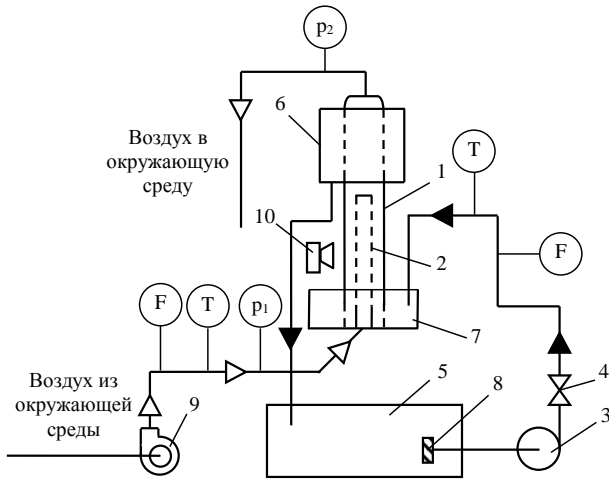
**Рис. 1 – Контактное прямоточное устройство вихревого типа: 1 – внешний цилиндр; 2 – внутренний цилиндр; 3 – полотно; 4, 5, 6, 7 – отверстия; 8 – гидрозатвор**

**Fig. 1 – Direct-flow vortex contact device: 1 – outer cylinder; 2 – inner cylinder; 3 – plate; 4, 5, 6, 7 – holes; 8 – water seal**

Экспериментальные исследования по изучению гидродинамики работы разработанного устройства вихревого типа были проведены вы на установке, изображенной схематично на рис. 2. Эксперименты

проводились на системе воздух–вода при температуре 273К и атмосферном давлении при скорости газа по аппарату 9–25 м/с.

Вода подавалась в межцилиндрическое пространство контактного устройства посредством заполнения емкости 7, при этом диапазон скоростей течения жидкости через отверстия в корпусе аппарата 1 составлял от 0,2 до 2 м/с.



**Рис. 2 – Принципиальная схема лабораторной установки: 1 – аппарат; 2 – внутренний цилиндр; 3 – насос; 4 – вентиль; 5, 6, 7 – емкости; 8 – фильтр; 9 – вентилятор; 10 – фотокамера; датчики: F – расход; T – температура; p – давление**

**Fig. 2 – Basic diagram of the laboratory setup: 1 – apparatus; 2 – inner cylinder; 3 – pump; 4 – valve; 5, 6, 7 – vessels; 8 – filter; 9 – fan; 10 – camera; sensors: F – flow rate; T – temperature; p – pressure**

Рассмотрим работу сепарационной части аппарата. При восходящем вихревом дисперсно-кольцевом газожидкостном потоке на внутренней поверхности контактного устройства наблюдается следующая картина. При развитии турбулентности в жидкости профиль скорости в пленке претерпевает изменения: это проявляется в снижении коэффициента, характеризующего соотношение между скоростью на внешней границе пленки и ее средним значением по толщине. Значение давления, создаваемого движущимся с закруткой газовым потоком на внутренние стенки внешнего цилиндра, рассчитывается согласно [18]:

$$P = P_0 + \frac{\rho_G}{2} (W_\phi^2 + W_z^2), \quad (1)$$

где  $P_0$  – избыточное давление газовой среды, Па;  $\rho_G$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $W_\phi$ ,  $W_z$  – составляющие вектора скорости газа (тангенциальная и осевая соответственно), м/с.

Давление, генерируемое центробежными силами во время вращения самой жидкой пленки:

$$P_2 = \frac{\delta \rho_L U_\phi}{R}, \quad (2)$$

где  $\delta = 3,117q^{7/12} \nu_L^{1/12} / g^{1/3}$  – толщина пленки, м;  $q$  – линейная объемная плотность орошения, м<sup>2</sup>/с;  $\nu_L$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_L$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение

свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $U_\phi$  – тангенциальная скорость жидкости, м/с;  $R$  – радиус, м [19].

Величину давления, возникающую вследствие торможения потока жидкости непосредственно в области входа (устья) отверстий сепарационной зоны контактного устройства, определим следующим образом:

$$P_3 = 0,5 \rho_L U_{cp}^2, \quad (3)$$

где  $U_{cp}$  – средняя скорость течения пленочной жидкости, м/с.

Для оценки скорости вращения пленочной жидкости принимается допущение о совпадении углов закрутки газа и пленки, расчет которых базируется на формуле из [20]:

$$\cos \varphi = \frac{W_z}{W_{cp}}. \quad (4)$$

Скорость поверхностного слоя жидкости может быть найдена через следующее соотношение [21]:

$$U_f = 1,44 \text{Re}_L^{0,45} (g \nu_L)^{1/3}, \quad (5)$$

где  $\text{Re}_L = \frac{4q}{\nu_L \cos \varphi}$  – число Рейнольдса для пленочного слоя с учетом закрутки [22].

Вследствие взаимодействия газовой закрученной струи с поверхностью пленки на ней активно развиваются волны. Как следствие этого процесса, скорость жидкости в зоне межфазной границы превышает ее среднее значение по всему сечению слоя. Среднеинтегральную скорость пленки вычислим по методике [21]:

$$\frac{U_f}{U_{cp}} = 1,3554 - 9,18 \cdot 10^{-4} \text{Re}_L + 1,15 \cdot 10^{-6} \text{Re}_L^2. \quad (6)$$

Значение скорости жидкости, протекающей сквозь отверстия сепарационной зоны контактного устройства, получено путем решения уравнения баланса энергии для жидкой фазы:

$$W_{отв} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi_0}} \sqrt{\frac{2P_0}{\rho_L} + \frac{\rho_G}{\rho_L} (W_\phi^2 + W_z^2) + \frac{\delta \cdot U_\phi}{R} + U_{cp}}. \quad (7)$$

Коэффициент сопротивления отверстий сепаратора  $\xi_0$  определяется гидравлическими потерями при прохождении жидкости через отверстие в стенке по известным зависимостям [23], зависит от геометрии отверстия (форма, размеры, обработка кромок) и режима течения [24].

### Результаты и обсуждение

В ходе исследований обнаружено, что при увеличении коэффициента сопротивления  $\xi_0$  скорость жидкости в отверстиях сепаратора монотонно убывает для всех значений отношения массовых расходов жидкой и газовой фаз  $L_m/G_m$ , что обусловлено ростом диссипации энергии при входе в отверстие (вихреобразование, трение) (рис. 3). Приблизительно 85–95% энергии теряется при прохождении через отверстия сепаратора. Причем темп падения скорости с ростом  $\xi_0$  примерно одинаков для разных отношений массовых расходов фаз, но абсолютное значение разное. Увеличение  $L_m/G_m$  означает рост массового расхода жидкости при неизменном расходе газа. При постоянном значении  $\xi_0$  это приводит к снижению влияния

факторов, связанных с центробежным давлением и торможением пленки, происходит разрушение вихревой структуры потока газа.

С увеличением коэффициента крутки возрастает тангенциальная составляющая скорости газа, что приводит к повышению динамического воздействия потока на поверхность пленки (рис. 4). Это выражается в увеличении касательных напряжений, которые действуют противоположно направлению стекания пленки под действием силы тяжести. Для сохранения расхода жидкости (при постоянном значении  $L_m/G_m$ ) пленка вынуждена увеличивать свою толщину, компенсируя возросшее сопротивление. При этом крутка газового потока создает центробежное поле, которое дополнительно прижимает жидкость к стенке цилиндра. Это способствует утолщению пленки, особенно в областях с высокой тангенциальной скоростью. При этом радиальное распределение давления в газе также изменяется, что влияет на условия течения пленки.

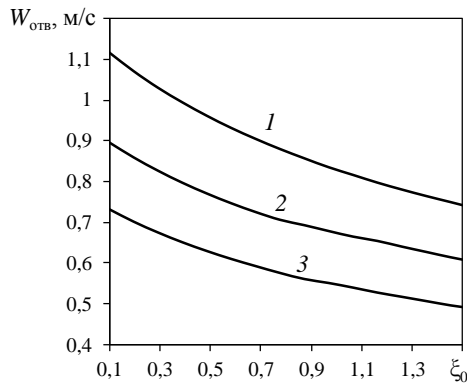


Рис. 3 – Зависимость скорости жидкости в проходах сепарационной зоны контактного устройства от величины коэффициента сопротивления отверстий для различных значений массовых расходов  $L_m/G_m$ , кг/кг: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3

Fig. 3 – The dependence of the liquid velocity in the passages of the separation zone of the contact device on the orifice resistance coefficient for different values of mass flow ratios  $L_m/G_m$ , kg/kg: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3

Повышение крутки интенсифицирует турбулентные пульсации в пристенной области, что изменяет профиль скорости в пленке. Турбулентное течение характеризуется более равномерным распределением скорости по толщине, что при фиксированном расходе приводит к увеличению средней толщины по сравнению с ламинарным режимом.

Для  $L_m/G_m = 3$  толщина пленки изменяется от 0,53 до 0,71 мм, тогда как для  $L_m/G_m = 1$  – от 0,36 до 0,49 мм. Это связано с тем, что при высокой нагрузке по жидкости пленка более восприимчива к внешним воздействиям из-за большей массы и развитой поверхности раздела.

В случае больших расходов жидкости пленочный слой становится более уязвимым к аэродинамическим воздействиям газовой фазы, что ведет к росту доли уноса – с уровня 0,5% до 6% при значении

$L_m/G_m = 3$ . Следовательно, эксплуатация с отношением нагрузок выше 3 экономически нецелесообразна.

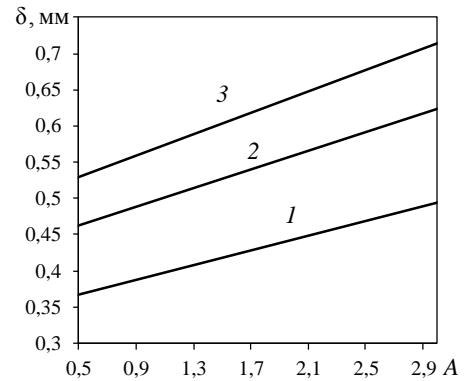


Рис. 4 – Изменение толщины пленки жидкости от коэффициента крутки газового потока при фиксированных нагрузках  $L_m/G_m$ , кг/кг: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3

Fig. 4 – Variation in liquid film thickness depending on the gas flow swirl coefficient at fixed mass flow ratios  $L_m/G_m$ , kg/kg: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3

Экспериментальные испытания выявили, что в интервале скоростей газа от 10 до 25 м/с жидкость сохраняет стабильное пленочное состояние (приведено на рис. 5). Для каждой заданной нагрузки по фазам наблюдается рост скорости движения жидкости в сепарационной зоне контактного устройства вместе с увеличением скорости газа. Это указывает на повышение массовой загрузки жидкостью, причем характер этой зависимости является нелинейным.

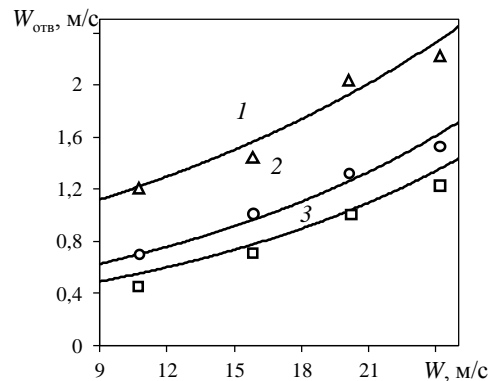


Рис. 5 – Зависимость скорости жидкости в отверстиях сепаратора от скорости газового потока при значениях  $L_m/G$ , кг/кг: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3

Fig. 5 – Dependence of the liquid velocity in the separator openings on gas flow velocity at  $L_m/G_m$ , kg/kg: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3

При увеличении скорости газа возрастает динамическое воздействие потока на поверхность пленки, усиливается турбулизация как газового ядра, так и поверхности пленки. Турбулентные пульсации способствуют более равномерному распределению скорости по толщине пленки.

## Заключение

Таким образом, представленные зависимости отражают баланс между силой тяжести, стремящейся утоньшить пленку, и касательными напряжениями со стороны газового потока, которые противодействуют стеканию, а также влиянием расхода жидкости. Основные выводы:

1. установлена монотонная зависимость скорости жидкости в отверстиях от коэффициента сопротивления  $\xi_0$  при сохранении расхода газа, потери энергии составляют 85–95%,
2. определено влияние коэффициента крутки газового потока на толщину жидкой пленки, увеличение крутки приводит к возрастанию толщины с 0,36 до 0,71 мм при  $L_m/G_m = 3$ ,
3. выявлена оптимальная зона устойчивости пленочного течения при скорости газа 9–25 м/с,
4. ограничен диапазон эффективной работы: увеличение  $L_m/G_m$  свыше 3 нецелесообразно из-за роста капельного уноса с 0,5% до 6%.

Обобщение результатов исследований с прямоточным устройством контакта вихревого типа дает основания считать перспективным использование такого оборудования для интенсификации процессов в двухфазных системах газ–жидкость.

## Благодарности

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (соглашение № 10/2025-ПД-КНИТУ от 22.12.2025).

## Acknowledgments

This work was carried out with the support of a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to higher education institutions, scientific and other organizations, aimed at supporting the development plans for human resources potential by encouraging their scientific and academic staff to defend doctoral dissertations and conduct research activities (Agreement No. 10/2025-PD-KNRTU dated 12/22/2025).

## Литература

1. А.С. Пушнов, М.Г.Г. Багомедов, М.Г. Беренгартен, *Химическая промышленность*, **95**, 3, 124–133 (2018).
2. Ž. Olujić, M. Jödecke, A. Shilkin, G. Schuch, B. Kaibel, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **48**, 6, 1089–1104 (2009). DOI: 10.1016/j.cer.2009.03.004.
3. Г.Б. Дмитриева, М.Г. Беренгартен, А.М. Каган, А.С. Пушнов, А.Г. Климов, *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 1, 9–10 (2007).
4. В.М. Олевский, В.Р. Ручинский, А.М. Кашников, В.И. Чернышев, *Пленочная тепло- и массообменная аппаратура*. М.: Химия, 1988. 239 с.
5. Ю.М. Тананайко, Е.Г. Воронцов, *Методы расчета и исследования пленочных процессов*, Киев: Техніка, 1975, 311 с.

6. Y. Meng, X. Ma, S. Hu, W. Zhang, M. Sun, *International Journal of Thermal Sciences*, **220**, Part B, 110398 (2026). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2025.110398.
7. F. Zhou, T. Lu, G. Ding, G. Yang, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **118**, 110154 (2020). DOI: 10.1016/j.exptthermflusci.2020.110154.
8. H. Hou, Q. Bi, H. Ma, G. Wu, *Desalination*, **285**, 393–398 (2012). DOI: 10.1016/j.desal.2011.10.020.
9. M. Waack, H. Glade, S. Nied, *Desalination and Water Treatment*, **211**, 1–14 (2021). DOI: 10.5004/dwt.2021.26453.
10. А.В. Дмитриев, И.Н. Мадышев, О.С. Дмитриева, *Экология и промышленность России*, **22**, 6, 10–14 (2018). DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-10-14.
11. А.Б. Голованчиков, Н.А. Меренцов, М.В. Топилин, А.В. Персидский, *Вестник технологического университета*, **21**, 9, 50–53 (2018).
12. Р.Ш. Абиев, А.А. Артамонов, *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*, 74, 50–60 (2025). DOI: 10.36807/1998-9849-2025-74-100-50-60.
13. Н.И. Савельев, Н.А. Николаев, *Теоретические основы химической технологии*, **21**, 4, 500–506 (1987).
14. А.В. Богаткова, А.С. Фролов, Д.А. Земцов, О.П. Жукова, Н.А. Войнов, *Химия растительного сырья*, 1, 347–354 (2020). DOI: 10.14258/jcprfm.2020015478.
15. X. Бахронов, А. Ахматов, Д. Жураев, *Химия и химическая технология*, **70**, 4, 47–50 (2020). DOI: 10.51348/RGIR9524.
16. А.О. Kuzmin, *Reviews in Chemical Engineering*, **37**, 1, 31–68 (2021). DOI: 10.1515/revce-2019-0019.
17. В.В. Харьков, О.С. Дмитриева, И.Н. Мадышев Пат. 2797870 Российская Федерация. *Контактное устройство вихревого типа*; опубл. 09.06.2023. Бюл. № 16.
18. А.А. Овчинников, *Динамика двухфазных закрученных турбулентных течений в вихревых сепараторах*. Казань: Новое знание, 2005. 288 с.
19. А.Г. Лаптев, *Модели пограничного слоя и расчет теплообменных процессов*. Казань: КГЭУ, 2007. 500 с.
20. Н.И. Савельев, Н.А. Николаев, *Теоретические основы химической технологии*, **23**, 4, 435–444 (1989).
21. Е.В. Сугак, Н.А. Войнов, Н.А. Николаев, *Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами*. Казань: Школа, 1999. 224 с.
22. А.Н. Николаев, А.В. Дмитриев, Д.Н. Латыпов, *Очистка газовых выбросов ТЭС, работающих на твердом и жидком топливе*. Казань: Новое знание, 2004. 136 с.
23. И.Е. Идельчик, *Справочник по гидравлическим сопротивлениям*. М.: Машиностроение, 1992 с. 672 с.
24. О.С. Попкова, О.С. Дмитриева, *Вестник технологического университета*, **19**, 13, 135–136 (2016).

## References

1. A.S. Pushnov, M.G.G. Bagomedov, M.G. Berengarten, *Himicheskaya promyshlennost'*, **95**, 3, 124–133 (2018). (In Russ).
2. Ž. Olujić, M. Jödecke, A. Shilkin, G. Schuch, B. Kaibel, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **48**, 6, 1089–1104 (2009). DOI: 10.1016/j.cer.2009.03.004.
3. G.B. Dmitrieva, M.G. Berengarten, A.M. Kagan, A.S. Pushnov, A.G. Klimov, *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 1, 9–10 (2007). (In Russ).
4. V.M. Olevskij, V.R. Ruchinskij, A.M. Kashnikov, V.I. Chernyshev, *Plenochhnaya teplo- i massoobmennaya apparatura*. Moscow: Himiya, 1988. 239 s. (In Russ).
5. Yu.M. Tananajko, E.G. Voroncov, *Metody rascheta i issledovaniya plenochnyh processov*, Kiev: Tekhnika, 1975, 311 s. (In Russ).

6. Y. Meng, X. Ma, S. Hu, W. Zhang, M. Sun, *International Journal of Thermal Sciences*, **220**, Part B, 110398 (2026). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2025.110398.
7. F. Zhou, T. Lu, G. Ding, G. Yang, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **118**, 110154 (2020). DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110154.
8. H. Hou, Q. Bi, H. Ma, G. Wu, *Desalination*, **285**, 393–398 (2012). DOI: 10.1016/j.desal.2011.10.020.
9. M. Waack, H. Glade, S. Nied, *Desalination and Water Treatment*, **211**, 1–14 (2021). DOI: 10.5004/dwt.2021.26453.
10. A.V. Dmitriev, I.N. Madyshev, O.S. Dmitrieva, *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, **22**, 6, 10–14 (2018). (In Russ). DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-10-14.
11. A.B. Golovanchikov, N.A. Merencov, M.V. Topilin, A.V. Persidskij, *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, **21**, 9, 50–53 (2018). (In Russ).
12. R.Sh. Abiev, A.A. Artamonov, *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)*, **74**, 50–60 (2025). (In Russ). DOI: 10.36807/1998-9849-2025-74-100-50-60.
13. N.I. Savel'ev, N.A. Nikolaev, *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii*, **21**, 4, 500–506 (1987). (In Russ).
14. A.V. Bogatkova, A.S. Frolov, D.A. Zemcov, O.P. Zhukova, N.A. Vojnov, *Himiya rastitel'nogo syr'ya*, **1**, 347–354 (2020). (In Russ). DOI: 10.14258/jcprm.2020015478.
15. H. Bahronov, A. Ahmatov, D. Zhuraev, *Himiya i himicheskaya tekhnologiya*, **70**, 4, 47–50 (2020). (In Russ). DOI: 10.51348/RGIR9524.
16. A.O. Kuzmin, *Reviews in Chemical Engineering*, **37**, 1, 31–68 (2021). DOI: 10.1515/revce-2019-0019.
17. V.V. Kharkov, O.S. Dmitrieva, I.N. Madyshev Pat. 2797870 RU. *Kontaknoe ustrojstvo vihrevogo tipa*; opubl. 09.06.2023. Byul. № 16. (In Russ).
18. A.A. Ovchinnikov, *Dinamika dvuhfaznyh zakruchennyh turbulentnyh techenij v vihrevykh separatorah*. Kazan: Novoe znanie, 2005. 288 s. (In Russ).
19. A.G. Laptev, *Modeli pograničnogo sloya i raschet teplomassoobmennyyh processov*. Kazan: KGEU, 2007. 500 s. (In Russ).
20. N.I. Savel'ev, N.A. Nikolaev, *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii*, **23**, 4, 435–444 (1989). (In Russ).
21. E.V. Sugak, N.A. Vojnov, N.A. Nikolaev, *Ochistka gazovyh vybrosov v apparatah s intensivnymi gidrodi-namicheskimi rezhimami*. Kazan: SHkola, 1999. 224 s. (In Russ).
22. A.N. Nikolaev, A.V. Dmitriev, D.N. Latypov, *Ochistka gazovyh vybrosov TES, rabotayushchih na tverdom i zhidkom toplive*. Kazan: Novoe znanie, 2004. 136 s. (In Russ).
23. I.E. Idel'chik, *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam*. Moscow: Mashinostroenie, 1992 s. 672 s. (In Russ).
24. O.S. Popkova, O.S. Dmitrieva, *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, **19**, 13, 135–136 (2016). (In Russ).

---

© **И. Н. Мадышев** – к.т.н., доцент, зав. кафедрой МАХП, Нижнекамский химико-технологический институт, филиал Казанского национального исследовательского технологического университета (НХТИ филиал КНИТУ), Нижнекамск, Россия, ilnyr\_91@mail.ru; **О. С. Дмитриева** – д.т.н., доцент кафедры ОПП, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия, ja\_deva@mail.ru; **А. О. Маясова** – старший преподаватель кафедры МАХП, НХТИ филиал КНИТУ, mayasova-fwoq@yandex.ru.

© **I. N. Madyshev** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Head of the Department of MACHP, Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology, a branch of Kazan National Research Technological University (NICT, a branch of KNRTU), Nizhnekamsk, Russia, ilnyr\_91@mail.ru; **O. S. Dmitrieva** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Department of Food Production Equipment, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia, ja\_deva@mail.ru, **A. O. Mayasova** – Senior Lecturer of the department of MACHP, NICT, a branch of KNRTU, mayasova-fwoq@yandex.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 16.03.26.

Дата принятия рукописи в печать – 07.04.26.