



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 532.51

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.028

EDN: NGZUUK

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ В МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛАХ ВИХРЕВОГО СЕПАРАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА С АКСИАЛЬНЫМ ЗАВИХРИТЕЛЕМ

Виталий Викторович Харьков<sup>1</sup>, Оксана Сергеевна Дмитриева<sup>2</sup>,  
Андрей Николаевич Николаев<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Казанский национальный исследовательский технологический институт, Казань, Россия

<sup>1</sup> v.v.kharkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

<sup>2</sup> ja\_deva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6221-0167>

<sup>3</sup> andr\_nik\_nik@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0714-2613>

**Аннотация.** Газожидкостные устройства вихревого типа широко применяются для сепарации дисперсной фазы от сплошного газового потока. Эффективность работы сепарационных устройств с лопаточными завихрителями определяется их гидродинамическими характеристиками. Статья посвящена теоретическому исследованию закономерностей движения и сепарации дисперсной фазы в вихревом сепарационном устройстве с аксиальным завихрителем потока газа. Эффективность таких устройств зависит от количества отсепарированной на лопастях жидкости, от дисперсного состава капель, пролетающих сквозь каналы завихрителя, в том числе от образующихся в результате дробления пленки отсепарированной жидкости. Результаты расчета помогут определить оптимальные размеры и форму межлопаточных каналов завихрителя с учетом дисперсности капель, что способствует улучшению эффективности сепарации. Представлена численная модель расчета движения дисперсной фазы в канале завихрителя. Траектории движения капель рассчитываются в закрученном потоке газа с учетом основных сил, действующих на них. Предложено уравнение для определения траектории движения капли в зазоре лопастей аксиального завихрителя вихревого сепарационного устройства. Рассматривалось движение капель диаметром от 0,01 до 1 мм при среднерасходной скорости газа 20 м/с. Расчет проводился в два этапа, при сравнении результатов расчета расходжение траекторий не превысило 18%. Найдено, что в процессе движения дисперсной фазы в межлопаточном канале завихрителя наблюдается активное взаимодействие капель с поверхностью лопастей. Капли крупного диаметра быстрее оседают на поверхности завихрителя, образуя пленку жидкости, тогда как мелкие капли проскальзывают через зазоры аксиального завихрителя.

**Ключевые слова:** аксиальный завихритель, сепарационное устройство, траектория капли, лопасть завихрителя, межлопаточный канал.

**Благодарности:** Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан (соглашение от 16.12.2024 г. № 113/2024-ПД).

**Для цитирования:** Харьков В. В., Дмитриева О. С., Николаев А. Н. Исследование гидродинамики в межлопаточных каналах вихревого сепарационного устройства с аксиальным завихрителем // Ползуновский вестник. 2025. № 4, С. 171–175. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.028. EDN: <https://elibrary.ru/NGZUUK>.

Original article

## FLUID DYNAMICS IN INTERBLADE CHANNELS OF VORTEX SEPARATION DEVICE WITH AXIAL SWIRLER

Vitaly V. Kharkov<sup>1</sup>, Oksana S. Dmitrieva<sup>2</sup>, Andrey N. Nikolaev<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

<sup>1</sup> v.v.kharkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

<sup>2</sup> ja\_deva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6221-0167>

<sup>3</sup> andr\_nik\_nik@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0714-2613>

**Abstract.** Vortex-type gas-liquid devices are widely used for separation of dispersed phase from continuous gas flow. The efficiency of separation devices with vane swirlers is determined by their hydrodynamic characteristics. The article is devoted to theoretical study of fluid dynamics and separation of dispersed phase in a vortex separation device with axial swirler for gas flow. The efficiency of such devices depends on the amount of liquid separated on the blades,

© Харьков В. В., Дмитриева О. С., Николаев А. Н., 2025

on the dispersion of droplets flying through the swirl channel, including those formed as a result of breaking up the film of separated liquid. The calculation results will help to determine the optimal dimensions and shape of the swirl interblade channels taking into account the dispersion of droplets, which helps to improve the separation efficiency. A numerical model for calculating the motion of the dispersed phase in the swirl channel is presented. The trajectories of the droplets are calculated in a swirling gas flow taking into account the main forces acting on them. An equation is proposed for determining the trajectory of a droplet in the gap of the blades of an axial swirl of the vortex separation device. The motion of droplets with a diameter of 0.01 to 1 mm at an average gas flow rate of 20 m/s was considered. The calculation was performed in two stages; when comparing the calculation results, the discrepancy of the trajectories did not exceed 18%. It was found that during the motion of the dispersed phase in the interblade channel of the swirl, active interaction of the droplets with the surface of the blades is observed. Large-diameter droplets settle faster on the surface of the swirl, forming a liquid film, while small droplets slip through the gaps of the axial swirl.

**Keywords:** axial swirl, separation device, droplet trajectory, swirl blade, interblade channel.

**Acknowledgements:** The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of sciences (postdoctoral fellows) for the purpose of defending their doctoral dissertation, completing research, as well as performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan (agreement dated 12.16.2024, No. 113/2024-PD).

**For citation:** Kharkov, V. V., Dmitrieva, O. S. & Nikolaev, A. N. (2025). Fluid dynamics in interblade channels of vortex separation device with axial swirl. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 171-175. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.04.028. EDN: <https://elibrary.ru/NGZUUK>.

## ВВЕДЕНИЕ

Процесс сепарации жидкости из газа широко встречается в химической, нефте- и газодобывающей отраслях промышленности, в частности для очистки промышленных газовых выбросов. Эффективным типом устройств для проведения процесса сепарации газожидкостных потоков является сепарационное устройство вихревого типа. Понимание структуры закрученного потока очень важно при проектировании новых вихревых сепарационных устройств, а также при определении их режимных параметров. Также эффективность отделения капель жидкости из газового потока, соответственно производительность устройств, определяются их конструкцией и геометрией лопастей. За последние несколько десятилетий было проведено значительное количество исследований [1–6] по исследованию конструкций сепараторов и улучшению их рабочих характеристик. Широкое промышленное применение имеют вихревые сепарационные устройства с завихрителем аксиального типа, в которых крутка придается двухфазному газожидкостному потоку. В процессе движения дисперсной фазы по каналам завихрителя, капли жидкости активно взаимодействуют с направляющими лопастями [7–9]. Большое количество капель под действием сил инерции оседает на лопастях завихрителя, образуя пленку жидкости. Несмотря на накопленные результаты исследований, до сих пор трудно предсказать сложные гидродинамические характеристики вихревых устройств, поэтому необходимы теоретические расчеты доли отсепарированной жидкости с учетом дисперсного состава капель, пролетающих сквозь каналы завихрителя.

В работе [10] на основе результатов приближенного аналитического исследования и эксперимента по определению количества влаги, сепарирующейся в лопаточном канале паровой турбины, было установлено, что капли диаметром более 2–3 мкм должны сепарироваться на вогнутой поверхности лопаток. Автором [10] рассматривалось движение капли в паровом потоке при обтекании решетки профилей. При этом пренебрегалось изменением количества движения за счет конденсации пара на каплях, силами тяжести и градиента давления в потоке. Исходя из этих условий дается уравнение движения капель определенного размера. Установлено также, что основным

фактором, влияющим на сепарацию капель в лопаточных каналах, является диаметр капель, а конструктивные факторы влияют в меньшей степени.

Активное взаимодействие частиц с элементами каналов отмечалось также в работах [11–13], где представлены результаты аналитического и экспериментального исследований движения частиц в криволинейных потоках.

Характер течения в сепарационном устройстве играет значительную роль при оценке его эффективности, поэтому актуальными являются исследования по изучению движения капель разного диаметра в газовом поле сепарационного устройства с аксиальным завихрителем и по их взаимодействию с поверхностями сепарационного стакана, лопатками, в межлопаточных каналах и др. Достижения в области вычислительной гидродинамики позволяют рассчитывать траектории частиц и действующие на них силы с помощью существующих моделей. Однако гидродинамические закономерности устройств вихревого типа отличаются сложностью описания, а наличие частиц в потоке газа дополнительно усложняет численное исследование, что делает его более дорогостоящим и трудоемким [14, 15].

Целью работы является теоретическое исследование закономерностей движения и сепарации дисперсной фазы в вихревом устройстве с аксиальным завихрителем потока газа.

## ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

Объектом исследования является вихревое сепарационное устройство с аксиальным завихрителем, которое схематично показано на рисунке 1. Завихритель имеет впускной цилиндр, соосный с цилиндром стакан и втулку обтекаемой формы, несколько неподвижных завихряющих лопаток, равномерно расположенных вокруг оси, кольцевой опускной узел отвода жидкости, корпус, патрубок отвода жидкости, верхнее выпускное отверстие для газа.

Газожидкостная смесь поступает в завихритель через впускной цилиндр, и капли жидкости прижимаются к стенке цилиндра под действием центробежной силы, создаваемой завихряющими лопатками. Достигнув стенки, капли осаждаются на ней и образуют пленку жидкости, которая окончательно удаляется из газового потока через узел отвода жидкости торOIDального типа и патрубок.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ В МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛАХ ВИХРЕВОГО СЕПАРАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА С АКСИАЛЬНЫМ ЗАВИХРИТЕЛЕМ

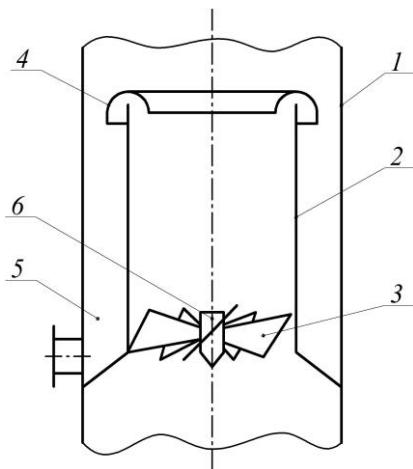


Рисунок 1 – Вихревое сепарационное устройство: 1 – впускной цилиндр; 2 – сепарационный стакан; 3 – лопатки аксиального завихрителя; 4 – узел окончательного разделения фаз; 5 – сборник жидкости; 6 – втулка

Figure 1 – Vortex separation device: 1 – body; 2 – separation cylinder; 3 – axial swirler; 4 – final phase separation unit; 5 – liquid collector; 6 – hub

В узле окончательного разделения тороидального типа пленка жидкости отделяется от газового потока и направляется в сборник. Поток газа некоторым количеством неотсепарированной жидкости выходит из сепаратора через верхнее отверстие.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Пространственное движение капель жидкости широкого спектра размеров под действием турбулентного газового потока является сложным явлением и определяется массой всевозможных параметров, таких как геометрические особенности области течения и свойствами взаимодействующих фаз. При его изучении обычно Методы исследования основываются на решении систем дифференциальных уравнений движения дисперсной фазы в канале завихрителя, записанных для прямоугольной системы координат.

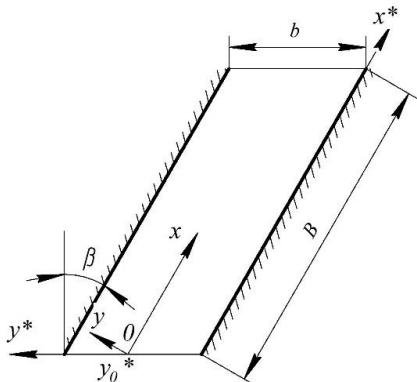


Рисунок 2 – Канал аксиального завихрителя

Figure 2 – Axial swirler channel

## УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В КАНАЛЕ ЗАВИХРИТЕЛЯ

При условии, что концентрация дисперсной фазы в большинстве практических случаев работы вихревых устройств невелика [16], рассматривалось

движение одиночной капли сферической формы.

Предполагалось, что капля не вращается вокруг собственной оси и ее плотность значительно превышает плотность газа. Из сил, действующих на каплю, учитывались силы тяжести и аэродинамического сопротивления. Для упрощения расчетов пренебрегалось перемещение капель в радиальном направлении, а также не учитывалась кривизна траектории в тангенциальном направлении. Движение рассматривалось в прямоугольной системе координат XY с центром в точке входа капли в зазор завихрителя и осью абсцисс, направленной вдоль лопасти завихрителя (рис. 2).

С учетом принятых допущений система уравнений, определяющих движение капли, записывалась в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} &= -g \cos \beta + \frac{3 \rho_g}{4 \rho_k} c_x \frac{V_k}{\delta_k} (W_x - V_x) \\ \frac{dV_y}{dt} &= -g \sin \beta + \frac{3 \rho_g}{4 \rho_k} c_x \frac{V_k}{\delta_k} (W_y - V_y), \\ \frac{dx}{dt} &= V_x \\ \frac{dy}{dt} &= V_y \end{aligned} \quad (1)$$

где  $V_x$ ,  $V_y$  и  $W_x$ ,  $W_y$  – составляющие скорости капли и газа, соответственно, м/с;  $\beta$  – угол наклона лопастей завихрителя к его оси, °;  $\rho_g$  – плотность газового потока, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_k$  – плотность жидкой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $c_x$  – коэффициент лобового сопротивления капли;  $\delta_k$  – диаметр капли, м;  $V_k$  – относительная скорость капли, рассчитываемая по формуле, м/с:

$$V_k = (W_x - V_x)^2 + (W_y - V_y)^2. \quad (2)$$

Течение газового потока в зазоре аксиального завихрителя представлено как течение идеальной несжимаемой жидкости со скоростью, равной скорости в живом сечении сепаратора

$$W_{bx} = W_{cp} / A, \quad (3)$$

где  $W_{cp}$  – среднерасходная скорость газа по аппарату, м/с;  $A$  – коэффициент крутки завихрителя.

Тогда в выбранной системе координат газовый поток характеризуется следующими составляющими скорости:

$$W_x = W_{cp} / A; \quad W_y = 0. \quad (4)$$

При задании начальных условий учитывалась скорость капли, приобретенная в процессе ее поступательного движения по трубопроводу до входа в аксиальный завихритель. Так как размер капель мал и их проскальзывание относительно газового потока при поступательном установившемся движении практически отсутствует, начальные условия записывались в виде:

$$t = 0; \quad V_x = W_{cp} \cos \beta; \quad V_y = W_{cp} \sin \beta. \quad (5)$$

## ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В КАНАЛЕ ЗАВИХРИТЕЛЯ

Интегрирование системы дифференциальных уравнений (1) при начальных условиях (5) проводилось в два этапа. На первом этапе расчета коэффициент сопротивления капли задавался зависимостью

$$c_x = \frac{24}{Re_k} + \frac{4,565}{Re_k^{1/3}} - \frac{0,491}{Re_k^{1/2}}, \quad (6)$$

где  $Re_k$  – число Рейнольдса для капли, справедливой в широком диапазоне чисел Рейнольдса [17]. Было

установлено, что влияние силы тяжести на траектории движения капель весьма мало и им можно пренебречь.

На втором этапе предполагалось, что сопротивление капли подчиняется закону Стокса вида:

$$c_x = \frac{24}{Re_k}, \quad (7)$$

в этом случае решение системы (1) может быть получено в аналитическом виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_x = \frac{W_{cp}}{A} [1 - \exp(-t/\tau)] + \\ + W_{cp} \cos \beta \exp(-t/\tau) \\ V_y = W_{cp} \sin \beta \exp(-t/\tau) \\ x = \frac{W_{cp}}{A} [-t + t + \tau \exp(-t/\tau)] + \\ + W_{cp} \cos \beta t [1 - \exp(-t/\tau)] \\ y = W_{cp} \sin \beta t [1 - \exp(-t/\tau)] \end{array} \right. , \quad (8)$$

где  $\tau = \delta_k^2 / \left( 18 \frac{\rho_r}{\rho_k} V_r \right)$ .

Для удобства расчета траекторий параметрическая связь координат со временем движения капли исключалась. С учетом этого уравнение траектории капли в зазоре лопастей аксиального завихрителя записывалось в виде:

$$\frac{A}{W_{cp} \tau} x = \frac{A \cos \beta - 1}{\tau W_{cp} \sin \beta} y - \ln \left( 1 - \frac{1}{\tau W_{cp} \sin \beta} y \right), \quad (9)$$

В ходе сравнения результатов расчета на первом и втором этапах было установлено, что расхождение параметров траекторий не превышает 18%. Расчеты выполнялись для вихревых сепарационных устройств с аксиальным завихрителем, угол наклона направляющих лопастей которого составлял 45°. Рассматривалось движение капель диаметром от 0,01 до 1 мм при скорости газа по аппарату 20 м/с. Величина параметра 1/τ варьировалась от 0,3 до  $3,3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ .

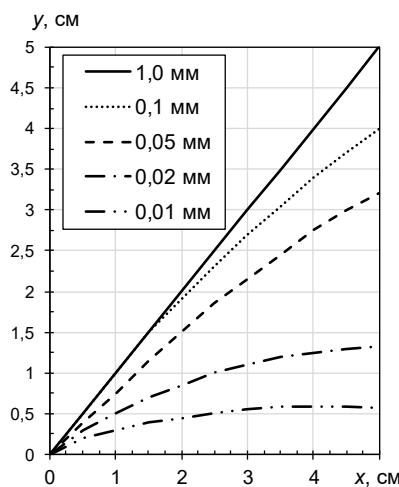


Рисунок 3 – Траектории движения капель в канале аксиального завихрителя вихревого сепарационного устройства капель разного диаметра  $\delta_k$  ( $W_{in} = 20 \text{ м/с}$ ,  $\beta = 45^\circ$ )

Figure 3 – Trajectories of droplet motion in the channel of the axial swirler of the vortex separation device with a change in droplet diameter  $\delta_d$  ( $W_{in} = 20 \text{ m/s}$ ,  $\beta = 45^\circ$ )

Расчеты, представленные на рисунке 3, показали, что в процессе движения через завихритель капли жидкой фазы действительно активно взаимодействуют с лопастями завихрителя. Крупные капли под действием сил инерции продолжают прямолинейное движение, незначительно отклоняясь в направлении газового потока, и оседают на пластины завихрителя. Мелкие капли, как менее инерционные, следуют за газовым потоком и проходят через зазоры завихрителя в зону сепарации. С увеличением скорости газа граница диаметров капель, оседающих на поверхность завихрителя, смещается в область меньших значений.

Понимание распределения размеров капель и их поведения в потоке позволяет лучше управлять процессом сепарации, адаптируя его к изменяющимся условиям эксплуатации сепаратора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Теоретические расчеты являются важным инструментом для повышения эффективности, оптимизации и управления процессом сепарации в устройствах с аксиальным завихрителем.

2. Крупные капли под действием сил инерции продолжают прямолинейное движение, незначительно отклоняясь в направлении газового потока, и оседают на пластины завихрителя. Мелкие капли, как менее инерционные, следуют за газовым потоком и проходят через зазоры завихрителя в зону сепарации. По мере поступления и сбора большого количества мелких капель на лопастях объем пленки увеличивается.

3. Капли жидкости могут взаимодействовать с элементами завихрителя, вызывая дополнительные потери энергии из-за столкновений и изменения траекторий движения. С увеличением скорости газа граница диаметров капель, оседающих на поверхность завихрителя, смещается в область меньших значений.

В дальнейшем планируется определить долю капель, взаимодействующих с поверхностью лопасти аксиального завихрителя, а также выявить закономерности изменения скорости капли в момент удара о лопасть.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Дмитриева О.С. Улавливание мелкодисперсных капель из газового потока в сепарационном устройстве с двутавровыми элементами // Промышленная энергетика. 2020. № 12. С. 47–53.
2. Review of confined swirling flows and bluff body impacts on flow and heat transfer characteristics / I. Adeyemi [et al.] // Chemical Engineering Research and Design. 2022. Vol. 187. P. 359–386. doi: 10.1016/j.cherd.2022.09.010.
3. Experimental study on the flow behaviors in a vane-type separator / X. Zeng [et al.] // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. 2023. Vol. 186. Article 109328. doi: 10.1016/j.cep.2023.109328.
4. Нурсте Х.О., Иванов Ю.В., Луби Х.О. Исследование аэродинамики потока в закручивающих устройствах // Теплоэнергетика. 1978. № 1. С. 37–39.
5. Харьков В.В., Николаев А.Н. Инженерная методика расчета вихревой камеры со взвешенным капельным слоем // Химическая промышленность сегодня. 2017. № 1. С. 16–21.
6. Экспериментальное определение гидравлического сопротивления мультивихревого сепаратора / В.Э. Зинуров [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С. 191–199. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.024.
7. Харьков В.В., Николаев А.Н. Разработка и исследование аппарата вихревого типа для концентрирования фруктовых соков // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 14. С. 445–448.
8. Харьков В.В. Моделирование тепло- и массообмена

# ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ В МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛАХ ВИХРЕВОГО СЕПАРАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА С АКСИАЛЬНЫМ ЗАВИХРИТЕЛЕМ

на при концентрировании соков в вихревой камере // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 1. С. 37–44.

9. Овчинников А.А., Харьков В.В. Описание структуры закрученных потоков в вихревых камерах // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 23. С. 322–325.

10. Циглер Х.Х. Сепарация влаги в лопаточном канале паровой турбины // Энергомашиностроение. 1967. № 4. С. 23–25.

11. Шейнин С.И., Ушаков С.Г., Клепикова Т.М. Расчетно-экспериментальное исследование сепарации капельной влаги из криволинейного двухфазного потока // Теплоэнергетика. 1976. № 6. С. 56–58.

12. Школьник Г.Т., Ушаков С.Г. Движение твердых частиц в межлопаточных каналах паровых турбин // Теплоэнергетика. 1971. № 3. С. 32–35.

13. Марчик Э.А. Движение конденсированной фазы в межлопаточных каналах ступени осевой газовой турбины // Теплоэнергетика. 1965. № 10. С. 51–57.

14. Maluta F., Paglianti A., Montante G. Experimental and numerical study of a compact inline swirler for gas–liquid separation // Chemical Engineering Science. 2023. Vol. 265. Article 118219. doi: 10.1016/j.ces.2022.118219.

15. Numerical analysis of turbulent swirling decay pipe flow / A. Najafi [et al.] // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2005. Vol. 32. № 5. P. 627–638. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.10.014.

16. Движение газожидкостных смесей в трубах / В.А. Мамаев [и др.]. М. : Недра, 1978. 270 с.

17. Вахрушев И.А. Общее уравнение для коэффициента лобового сопротивления частиц различной изометрической формы при относительном движении в безграничной среде // Химическая промышленность. 1965. № 8. С. 614–617.

## Информация об авторах

В. В. Харьков – кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование пищевых производств» Казанского национального исследовательского технологического университета.

О. С. Дмитриева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование пищевых производств» Казанского национального исследовательского технологического университета.

А. Н. Николаев – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Оборудование пищевых производств» Казанского национального исследовательского технологического университета.

## REFERENCES

1. Zinurov, V.E., Dmitriev, A.V. & Dmitrieva, O.S. (2020). Capture of fine droplets from a gas stream in a separation device with I-beam elements. *Promyshlennaya energetika*, (12), 47–53. (In Russ.).
2. Adeyemi, I., Kharoua, N., Khezzar, L., Meribout, M. & AlHammadi K. (2022). Review of confined swirling flows and bluff body impacts on flow and heat transfer characteristics. *Chemical Engineering Research and Design*, 187, 359–386. doi: 10.1016/j.cherd.2022.09.010.
3. Zeng, X., Wang, M., Fan, G., Cheng, J. & Yan C. (2023). Experimental study on the flow behaviors in a vane-type separator. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 186, 109328. doi: 10.1016/j.cep.2023.109328.
4. Nurste Kh.O., Ivanov Yu.V., Lubi Kh.O. (1978). In-vestigation of flow aerodynamics in swirling devices. *Teploenergetika*, (1), 37–39. (In Russ.).
5. Kharkov, V.V. & Nikolaev A.N. (2017). Engineering methodology for calculating a vortex chamber with a suspended droplet layer. // *Himicheskaya promyshlennost' segodnya*, (1), 16–21. (In Russ.).
6. Zinurov, V.E., Bikkulov, R.Ya., Dmitrieva, O.S., Madyshev, I.N. & Abdullina, A.A. (2023). Experimental determination of hydraulic resistance of a multi vortex separator. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 191–199. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.024. (In Russ.).
7. Kharkov, V.V. & Nikolaev, A.N. (2014). Development and research of a vortex type apparatus for concentrating fruit juices. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 17(14), 445–448. (In Russ.).
8. Kharkov, V.V. (2016). Modeling of heat and mass transfer during juice concentration in a vortex chamber. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ya*, (1), 37–44. (In Russ.).
9. Ovchinnikov, A.A. & Kharkov, V.V. (2014). Description of the structure of swirling flows in vortex chambers. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 17(23), 322–325. (In Russ.).
10. Tsigler, Kh.Kh. (1967). Separation of moisture in the blade channel of a steam turbine. *Energomashinostroenie*, (4), 23–25. (In Russ.).
11. Sheynin, S.I., Ushakov, S.G. & Klepikova T.M. (1976). Computational and experimental study of droplet moisture generation from a curved two-phase flow. *Teploenergetika*, (6), 56–58. (In Russ.).
12. Shkol'nik, G.T. & Ushakov S.G. (1971). Movement of solid particles in the interscapular channels of steam turbines. *Teploenergetika*, (3), 32–35. (In Russ.).
13. Marchik, E.A. (1965). Motion of the condensed phase in the interscapular channels of the axial gas turbine stage. *Teploenergetika*, (10), 51–57. (In Russ.).
14. Maluta, F., Paglianti, A. & Montante, G. (2023). Experimental and numerical study of a compact inline swirler for gas–liquid separation. *Chemical Engineering Science*, 265, 118219. doi: 10.1016/j.ces.2022.118219.
15. Najafi, A., Saidi, M.H., Sadeghipour, M.S. & Souhar, M. (2005). Numerical analysis of turbulent swirling decay pipe flow. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32(5), 627–638. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.10.014.
16. Mamaev, V.A., Odishariya, G.E., Klepikov, O.V., Tochilin, A.A. & Semenov, N.I. (1978). Movement of gas-liquid mixtures in pipes. Moscow : Nedra. (In Russ.).
17. Vakhrushev, I.A. (1965). A general equation for the coefficient of drag of particles of various isometric shapes during relative motion in an infinite environment. *Khimicheskaya promyshlennost'*, (8), 614–617. (In Russ.).

## Information about the authors

V. V. Kharkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Food Production Equipment", Kazan National Research Technological University.

O. S. Dmitrieva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Food Production Equipment", Kazan National Research Technological University.

A. N. Nikolaev – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department "Food Production Equipment", Kazan National Research Technological University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 июня 2025; одобрена после рецензирования 24 ноября 2025; принятая к публикации 28 ноября 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2025; approved after editing on 24 Nov 2025; accepted for publication on 28 Nov 2025.