



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 532.5.013

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.030

EDN: BDHIOC

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ В ВИХРЕВОМ СЕПАРАЦИОННОМ УСТРОЙСТВЕ С АКСИАЛЬНЫМ ЗАВИХРИТЕЛЕМ

Оксана Сергеевна Дмитриева¹, Виталий Викторович Харьков²,
Андрей Николаевич Николаев³

^{1, 2, 3} Казанский национальный исследовательский технологический институт, Казань, Россия

¹ ja_deva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6221-0167>

² v.v.kharkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

³ andr_nik_nik@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0714-2613>

Аннотация. Сепараторы вихревого типа для разделения газожидкостных потоков в закрученном потоке являются распространенным типом промышленного оборудования. Однако большая часть данных по гидравлическому сопротивлению для аппаратов с аксиальными завихрителями получено на системе воздух–вода. Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований по оценке влияния вязкости дисперсной фазы на гидравлические потери в вихревом сепарационном устройстве с аксиальным завихрителем. В ходе экспериментального исследования изменились: скорость газового потока от 15 до 23 м/с, отношение расходов жидкой и газовой фаз от 0 до 0,3, вязкость жидкости от 1 до 50 мм²/с. В ходе обработки экспериментальных данных была получена эмпирическая зависимость, отражающая степенную зависимость возрастания гидравлических потерь в устройстве от вязкости жидкой фазы. Результаты исследований показали, что увеличение вязкости дисперсной фазы увеличивает гидравлическое сопротивление устройства, зависит от скорости потока и режима течения. При отношении расходов фаз от 0,05 до 0,3 коэффициент гидравлического сопротивления сепаратора с аксиальными завихрителями увеличивается с 9,6 до 12,75 при вязкости жидкости 1 мм²/с, с 10 до 14,5 при вязкости жидкости 30 мм²/с, с 10,45 до 15,4 при вязкости жидкости 50 мм²/с. Найдено, что перепад давления варьировался от 1400 до 3200 Па при скорости от 15 до 23 м/с. Полученные экспериментальные данные были сопоставлены с данными других авторов для вихревых элементов аксиального типа. За счет применения устройства для отвода отсепарированной жидкости в среднем наблюдается увеличение перепада давления в 2,2 раза среди рассмотренных модификаций, однако при этом обеспечивается лучшее отделение жидкости от газа.

Ключевые слова: закрученный поток, вихревое устройство, гидравлическое сопротивление, вязкость жидкости, сепарация.

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: Дмитриева О. С., Харьков В. В., Николаев А. Н. Экспериментальное исследование перепада давления в вихревом сепарационном устройстве с аксиальным завихрителем // Ползуновский вестник. 2025. № 4, С. 180–184. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.030. EDN: <https://elibrary.ru/BDHIOC>.

Original article

EXPERIMENTAL STUDY OF PRESSURE DROP IN VORTEX SEPARATION DEVICE WITH AXIAL SWIRLER

Oksana S. Dmitrieva¹, Vitaly V. Kharkov², Andrey N. Nikolaev³

^{1, 2, 3} Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

¹ ja_deva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6221-0167>

² v.v.kharkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

³ andr_nik_nik@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0714-2613>

Abstract. Vortex-type devices for separating gas-liquid flows in swirling flow are a common type of industrial equipment. However, most of the data on pressure drop for devices with axial swirlers is obtained in the air-water system. The goal of this work is to conduct experimental studies to assess the effect of the viscosity of the dispersed phase on hydraulic losses in a vortex separation device with an axial swirler. During the experimental study, the gas velocity changes from 15 to 23 m/s, the ratio of the liquid and gas phases from 0 to 0.3, the viscosity of the liquid from 1 to 50 mm²/s. In the course of processing experimental data, an empirical relationship was obtained that reflects the wall dependence of the increase in pressure drop in the

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ В ВИХРЕВОМ СЕПАРАЦИОННОМ УСТРОЙСТВЕ С АКСИАЛЬНЫМ ЗАВИХРИТЕЛЕМ

device on the viscosity of the liquid phase. The results of studies have shown that an increase in the viscosity of the dispersed phase increases the pressure drop of the device and depends on the flow rate and flow regime. At a phase flow ratio of 0.05 to 0.3 the coefficient of hydraulic pressure of separator with axial swirlers increases from 9.6 to 12.75 at a liquid viscosity of 1 mm²/s, from 10 to 14.5 at a liquid viscosity of 30 mm²/s, from 10.45 to 15.4 at a liquid viscosity of 50 mm²/s. The pressure drop ranged from 1400 to 3200 Pa at a gas velocity of 15 to 23 m/s. The experimental data obtained were compared with those of other authors for vortex elements of the axial type. Due to the use of the device for discharging the separated liquid, on average, a 2.2-times increase in pressure drop is observed among the modifications considered; however, a better separation of liquid from gas is provided.

Keywords: swirling flow, vortex device, hydraulic resistance, liquid viscosity, separation.

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 December, 16, 2024, No. 113/2024-PD).

For citation: Dmitrieva, O. S., Kharkov, V. V. & Nikolaev, A. N. (2025). Experimental study of pressure drop in vortex separation device with axial swirlers. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 180-184. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.04.030. EDN: <https://elibrary.ru/BDHIOC>.

ВВЕДЕНИЕ

Закрученный поток широко используется во многих отраслях промышленности, таких как энергетика, химия, нефтехимия и другие. Для создания закрученного потока в настоящее время применяют несколько различных устройств, в том числе лопастные закручивающие устройства (аксиальные, тангенциальные, аксиально-тangенциальные) [1–4]. Аксиальные завихрители наиболее широко применяются на практике для локальной закрутки потоков в виду универсальности их конструкции. В настоящее время в литературе имеется весьма обширная база данных по гидродинамике закрученных потоков, индуцированных закручивающими устройствами этого типа. Особенности формирования течения зависят от тангенциальной и осевой компонент скоростей и геометрических параметров закручивающего устройства, поэтому полученные результаты обеспечивают мощную теоретическую основу для оптимизации процесса и имеют практическое значение в области инженеринга.

Для оценки гидродинамических характеристик сепарационных устройств с завихрителями необходимо определить гидравлическое сопротивление, что позволяет оценить энергетические затраты газового потока на проведение процесса и влияние характера потока на эффективность разделения, что и обуславливает в дальнейшем его область применения. Так, например, в работах [5, 6] представлены закономерности изменения гидравлического сопротивления сепараторов с аксиальным плосколопастным завихрителем с углом наклона лопастей завихрителя 45–75°, полученная в ходе исследований величина гидравлического сопротивления сухих аппаратов пропорциональна квадрату скорости газа. При этом наблюдается рост величины гидравлического сопротивления по мере увеличения угла наклона лопасти завихрителя, что объясняется увеличением крутки потока газа. Под действием закрутки характеристики течения газовой и жидкой фазы отличаются от характеристик течения в кольцевом потоке без закрутки. Длина завихрителя обычно ограничивается, чтобы уменьшить перепад давления закрученного потока [7].

Наличие жидкой фазы увеличивает общую массу потока, что требует больше энергии для поддержания той же скорости движения. Это также способствует увеличению гидравлического сопротивления. При этом автомодельность коэффициента гидравлического сопротивления вихревого сепаратора сохраняется, а прирост гидравлического сопротивления прямо пропорционален плотности орошения, количеству жидкости, приходящейся на единицу площади поперечного сечения аппарата. У вихревого массо-

обменного аппарата при подаче орошения автомодельность гидравлического сопротивления по расходу нарушается, а прирост сопротивления прямо пропорционален нагрузке аппарата по жидкой фазе L/G .

Результаты исследований авторов [8] по изучению гидродинамических закономерностей вихревого аппарата с аксиальным завихрителем с углом наклона лопастей 45, 60, 75° также подтверждают, что гидравлическое сопротивление аппарата пропорционально квадрату среднерасходной скорости и плотности орошения.

В работе [9] по исследованию вихревого аппарата с аксиальным завихрителем с углом наклона лопастей 60, 74, 78° выявлено наличие двух аэродинамических режимов работы. При первом, когда осевая скорость потока менее 20 м/с гидравлическое сопротивление аппарата пропорционально скорости газового потока в степени 1,75, во втором, автомодельном – в степени 2.

Специфика подвода жидкости в сепаратор до закручивающего устройства показывает степень влияния скорости газового потока на гидравлические потери в аппарате меньше 2 [10], что может быть обусловлено как аэродинамической структурой потока в аппарате, так и внешними причинами, в том числе вводом дисперсной фазы.

Стоит отметить, что большинство известных данных по гидравлическому сопротивлению вихревых аппаратов получено на системе воздух–вода, что затрудняет практическую эксплуатацию таких сепараторов, следовательно, необходим более всесторонний анализ.

Целью работы является экспериментальное исследование гидравлического сопротивления в сепарационном устройстве вихревого типа с аксиальным завихрителем потока газа в зависимости от нагрузки по жидкой фазе, а также оценка влияния вязкости дисперсной фазы на гидравлические потери.

МЕТОДЫ

Проведение исследований по определению гидравлического сопротивления вихревого сепаратора с аксиальным завихрителем осуществлялось на экспериментальной установке при температуре 20°C. Исследовался вариант вихревого сепарационного устройства диаметром 100 мм, высотой 160 мм. Аксиальный завихритель сепаратора схематично представлен на рис. 1, он имел втулку диаметром 30 мм и состоял из десяти лопастей, установленных под углом 45° к оси сепаратора. Величина перекрытия лопастей завихрителя равнялась 0,5; коэффициент крутки завихрителя был равен 0,52. Сепаратор был снабжен узлом для отвода отсепарированной жидкости с лопастей завихрителя диаметром 8 мм с шириной

ной рабочей щели 1 мм, а также узлом окончательного отделения торOIDального типа [11].

Исследование проводилось на системе воздух–водный раствор глицерина, вязкость которого варьировалась от 1 до 50 мм²/с, при изменении скорости газового потока от 15 до 23 м/с и нагрузке по жидкости от 0 до 150 кг/ч. Двухфазный поток подавался в направляющие каналы, образованные лопастями аксиального завихрителя и приобретает вращательно-поступательное движение. Капли дисперсной фазы контактируют с лопастями и частично сепарируются на них. Под действием центробежной силы, возникающей при вращении двухфазного потока, капли жидкости отбрасываются на стенку сепарационного стакана и образуют на ней вращающуюся пленку жидкости.

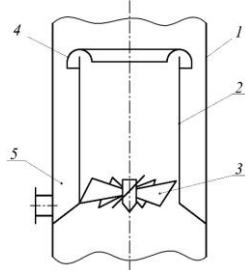


Рисунок 1 – Вихревое сепарационное устройство:
1 – корпус; 2 – сепарационный стакан; 3 – аксиальный завихритель; 4 – узел окончательного разделения фаз;
5 – сборник жидкости

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

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидравлическое сопротивление потоку возрастает за счет увеличения доли жидкой фазы в сепараторе, причем, как правило, характер квадратичной зависимости сопротивления от расхода газовой фазы сохраняется [12], что объясняется возрастающими энергетическими затратами на транспортировку дисперсной фазы внутри сепаратора за счет трения между фазами и изменения структуры потока.

Изменение вязкости дисперсной фазы не приводит к существенным изменениям в гидравлических закономерностях процесса разделения газожидкостного потока в вихревом сепарационном устройстве. Как и для системы воздух–вода энергетические потери газового потока, затрачиваемые на транспорт жидкой фазы, определяются расходом жидкой фазы и пропорциональны среднерасходной скорости газового потока по аппарату [13]. В то же время, эксперименты показали, что величина гидравлического сопротивления сепаратора зависит от вязкости жидкой фазы. С увеличением вязкости жидкости сопротивление сепаратора возрастает, причем влияние вязкости проявляется тем больше, чем выше ее значение (рис. 2). Так при удельной нагрузке $L/G = 0,3$ коэффициент гидравлического сопротивления равен 12,75, 14,5 и 15,4 при вязкости жидкости 1, 30 и 50 мм²/с соответственно.

Корреляционный анализ показал, что величина достоверности аппроксимации для линии 1 равен $R^2 = 0,9844$; 2 – $R^2 = 0,9941$; 3 – $R^2 = 0,9894$ (рис. 2). При

увеличении скорости потока газа, инерционные силы становятся более значительными по сравнению с вязкими силами. Это может привести к усилению турбулентности, что, в свою очередь, может компенсировать увеличение вязкости и стабилизировать или даже уменьшить гидравлическое сопротивление. При малых удельных нагрузках аппарата по жидкости затраты энергии газового потока на проведение сепарации незначительны, это связано со снижением потерь газового потока на трение.

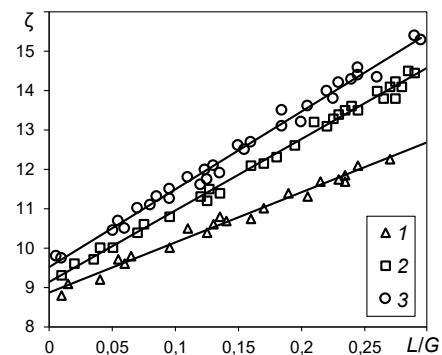


Рисунок 2 – Зависимость гидравлического сопротивления вихревого сепарационного устройства с аксиальным завихрителем от нагрузки по фазам при различной вязкости жидкости, мм²/с: 1 – 1; 2 – 30; 3 – 50

Figure 2 – Dependence of the pressure drop of the vortex separation device with the axial swirler on the flow ratio at different liquid viscosity, mm²/s: 1 – 1; 2 – 30; 3 – 50

Увеличение гидравлического сопротивления устройства при сепарации высоковязких сред связано с увеличением потерь энергии газового потока, идущих на транспорт дисперсной фазы и перемещение пленки отсепарированной жидкости в зоне продольной сепарации. Этот вывод подтверждается также результатами визуального наблюдения за работой сепарационного устройства, проводимого в ходе эксперимента. Отмечено, что с увеличением вязкости дисперсной фазы скорость движения пленки отсепарированной жидкости уменьшается, а толщина пленки и время пребывания жидкости в сепарационной зоне соответственно возрастают.

Таким образом, гидравлические закономерности исследуемого вихревого сепаратора аналогичны закономерностям, которые наблюдались при исследовании вихревых аппаратов другими авторами [14, 15]. Обработкой экспериментальных данных была получена эмпирическая зависимость, отражающая степенную зависимость возрастания гидравлических потерь в сепараторе от вязкости жидкой фазы:

$$\zeta = 9,2 \left[1 + 5,13 \cdot 10^{-6} \text{Re}_G \frac{L}{G} \left(\frac{v_L}{v_w} \right)^{0.35} \right], \quad (1)$$

где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления; Re_G – число Рейнольдса, рассчитанное по газу; L/G – отношение расходов по жидкой и газовой фазам; v_L – кинематическая вязкость жидкости, м²/с; v_w – кинематическая вязкость воды, м²/с.

Сравнение полученных эмпирических данных по гидравлическому сопротивлению вихревого сепарационного устройства с узлом для отвода отсепарированной жидкости с лопастями аксиального завихрителя с данными по гидравлическому сопротивлению вихревых устройств других исследователей показало, что введение узла для отвода жидкости привело к

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ В ВИХРЕВОМ СЕПАРАЦИОННОМ УСТРОЙСТВЕ С АКСИАЛЬНЫМ ЗАВИХРИТЕЛЕМ

некоторому увеличению энергетических потерь в аппарате при сохранении основных закономерностей изменения гидравлического сопротивления в зависимости от режимных и физических параметров (рис. 3).

Косвенным доказательством достоверности полученных закономерностей влияния вязкости на гидравлическое сопротивление вихревых устройств, являются материалы, представленные в работе [16] и отражающие результаты детального изучения вихревого массообменного аппарата с винтовым завихрителем. При изменении нагрузки по сплошной фазе в широком диапазоне конструктивных и технологических параметров для дисперсных систем воздух–вода, воздух–раствор этилового спирта, воздух–водные растворы глицерина, воздушная смесь углекислого газа–вода были обработаны результаты исследований, в рамках которых установлено два разных гидродинамических режима работы вихревого аппарата. Такие режимы характеризуются сменой величины гидравлического сопротивления, отметим, что при этом величина гидравлического сопротивления пропорциональна 1,56 величины среднерасходной скорости газа. Влияние плотности орошения, расхода газовой фазы и физических свойств фаз одинаково в обоих режимах, но степень их влияния различается.

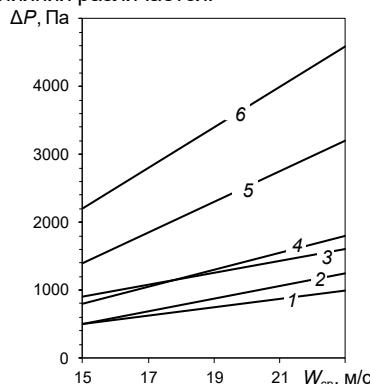


Рисунок 3 – Сравнение гидравлических сопротивлений различных вихревых устройств:
1 – данные по [10]; 2 – данные по [8]; 3 – данные по [6, 16]; 4 – данные по [5, 9]; 5 – экспериментальные данные;
6 – данные по [17]

Figure 3 – Comparison of the pressure drop of various vortex devices: 1 – data from [10]; 2 – data from [8]; 3 – data from [6, 16]; 4 – data from [5, 9]; 5 – experimental data; 6 – data from [17]

Увеличение плотности орошения приводит к увеличению энергетических потерь в аппарате; аналогично влияние вязкости жидкой фазы. Обратное действие оказывает изменение величины поверхностного натяжения, с увеличением которого гидравлическое сопротивление аппарата падает. При больших плотностях орошения степень влияния перечисленных параметров на величину гидравлического сопротивления возрастает. Положение границы режимов является сложной функцией физических свойств фаз и зависит от расхода газа.

Так как увеличение диаметра вихревых устройств, превышающее 200 мм, способствует уменьшению их эффективности [18] из-за образования зон с различной скоростью, то для обеспечения заданной производительности по газу устройства малого диаметра подключают параллельно. Поэтому вопрос о гидравлическом сопротивлении батареи

вихревых устройств при их параллельном включении представляет несомненный практический интерес.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Гидравлическое сопротивление вихревого сепарационного устройства с аксиальным завихрителем и устройством для отвода отсепарированной жидкости варьируется от 1400 до 3200 Па при среднерасходной скорости газового потока от 15 до 23 м/с.

2. За счет применения устройства для отвода отсепарированной жидкости в среднем наблюдается увеличение перепада давления в 2,2 раза среди рассмотренных модификаций, однако при этом обеспечивается лучшее отделение жидкости от газа. В случае сравнения с аналогом по данным [17] предложенная конструкция вихревого сепарационного устройства с аксиальным завихрителем позволяет сократить гидравлическое сопротивление на 27-30%.

3. Аксиальный завихритель предназначен для создания закрученного потока, который способствует более эффективному разделению фаз. При малых удельных нагрузках L/G эффективность разделения может снижаться, что также может повлиять на гидравлическое сопротивление.

4. При увеличении вязкости дисперсной фазы происходит изменение структуры вихревых течений и, как следствие, увеличивается гидравлическое сопротивление. При отношении L/G от 0,05 до 0,3 коэффициент гидравлического сопротивления сепаратора с аксиальными завихрителями увеличивается с 9,6 до 12,75, с 10 до 14,5, с 10,45 до 15,4 при вязкости жидкости 1, 30 и 50 $\text{мм}^2/\text{с}$ соответственно. Для оценки возрастания гидравлических потерь в сепараторе от вязкости жидкой фазы стоит воспользоваться полученной эмпирической зависимостью (1).

Также планируется оценить гидравлическое сопротивление при использовании завихрителей с профилированными лопастями, обеспечивающими безударный вход газового потока и его безотрывное течение по межлопаточным каналам завихрителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Flow characteristic and separation performance of co-current gas-liquid vortex separator / J. Gao [et al.]. // Powder Technology. 2024. Vol. 443. Article 119929. doi: 10.1016/j.powtec.2024.119929.
2. Харьков В.В., Николаев А.Н. Численное моделирование тепло- и массообмена в процессе концентрирования термолабильных растворов в закрученном потоке // Ползуновский вестник. 2017. № 1. С. 30–34.
3. Rocha A.D., Bannwart A.C., Ganzarolli M.M. Numerical and experimental study of an axially induced swirling pipe flow // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2015. Vol. 53. P. 81–90. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.02.003.
4. Харьков В.В., Николаев А.Н. Инженерная методика расчета вихревой камеры со взвешенным капельным слоем // Химическая промышленность сегодня. 2017. № 1. С. 16–21.
5. Марголин Е.В., Тарат Э.Я. Выбор оптимальных параметров вертикального каплеуловителя // Промышленная и санитарная очистка газов. 1976. № 3. С. 11–13.
6. Применение контактных тарелок с прямоточными центробежными элементами для интенсификации массообменных процессов / Э.И. Левданский [и др.]. // Азотная промышленность: сб. М.: НИИТЭХИМ, 1974. Вып. 6. С. 69–73.
7. Liu L., Bai B. Experimental study and similarity analysis of separation efficiency of swirl-vane separator // Nuclear Engineering and Design. 2020. Vol. 359. Article 110442. doi: 10.1016/j.nucengdes.2019.110442.
8. Карпенков А.Ф., Качан В.В., Шишко Б.М. Исследование

влияния конструкции завихрителя на аэродинамическую структуру закрученного потока в цилиндрической трубе // Химия и химическая технология: республиканский межведомственный сборник. Минск Вышэйшая школа, 1979. Вып. 14. С. 158–160.

9. Мусташин Ф.А., Николаев Н.А., Николаев А.М. Гидродинамические закономерности в массообменном аппарате вихревого типа // Труды Казан. хим.-технол. ин-та. 1970. № 45. С. 26–31.

10. Вихревые массообменные аппараты / С.С. Сабитов [и др.] // Общетраслевые вопросы развития химической промышленности Обзор. инф. сер. НИИТЭХИМ. 1981. № 3. С. 30.

11. Дмитриева О.С., Харьков В.В., Николаев А.Н. Дисперсный состав жидкой фазы вихревого сепарационного устройства // Вестник технологического университета. 2024. Т. 27. № 5. С. 54–58. doi: 10.55421/1998-7072_2024_27_5_54.

12. Вязовкин Е.С. Исследование гидродинамики и эффективности вихревых контактных ступеней: автореф. дис. ... кандидата техн. наук. Казань, 1972. 24 с.

13. Левданский Э.И. Исследование скоростной ректификации в аппаратах с прямоточно-центробежными контактными устройствами // 3-я Всес. конф. по теории и практике ректификации. Северодонецк, 1973. Ч. 2. С. 258–261.

14. 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.

15. Харьков В.В. Моделирование тепло- и массообмена при концентрировании соков в вихревой камере // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 1. С. 37–44.

16. Ершов А.И., Гухман Л.М., Бляхер Е.Г. Исследование гидродинамики восходящего двухфазного закрученного потока // Известия вузов СССР. Энергетика. 1971. № 10. С. 88–92.

17. Лукьянов В.П. Гидродинамические характеристики // Промышленная и санитарная очистка газов. 1976. № 5. С. 6–8.

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

Информация об авторах

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

В. В. Харьков – 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. Gao, J., Jin, W., E, C., Fan, Y. & Lu C. (2024). Flow characteristic and separation performance of co-current gas-liquid vortex separator. *Powder Technology*, 443. Article 119929. doi: 10.1016/j.powtec.2024.119929.
2. Kharkov, V.V. & Nikolaev, A.N. (2017). Numerical simulation of heat and mass transfer during the concentration of thermolabile solutions in a swirling stream. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 30–34. (In Russ.).
3. Rocha, A.D., Bannwart, A.C. & Ganzarolli, M.M. (2015). Numerical and experimental study of an axially induced swirling pipe flow. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 53, 81–90. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.02.003.
4. Kharkov, V.V. & Nikolaev A.N. (2017). Engineering methodology for calculating a vortex chamber with a suspended droplet layer.

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.

// *Himicheskaya promyshlennost' segodnya*, (1), 16–21. (In Russ.).

5. Margolin, E.V. & Tarat, E.Ya. (1976). Choosing the optimal parameters of a vertical drip trap. *Promyshlennaya i sanitarnaya ochistka gazov*, (3), 11–13. (In Russ.).

6. Levdanskiy, E.I., Plekhov, I.M., Ivanov, V.A. & Ershov, A.I. (1974). The use of contact plates with direct-flow centrifugal elements to intensify mass transfer processes. *Azotnaya promyshlennost' from sb. NIITEKhIM*, Moscow, 6, 69–73. (In Russ.).

7. Liu, L. & Bai, B. (2020). Experimental study and similarity analysis of separation efficiency of swirl-vane separator. *Nuclear Engineering and Design*, 359, Article 110442. doi: 10.1016/j.nucengdes.2019.110442.

8. Karpenkov, A.F., Kachan, V.V. & Shishlo, B.M. (1979). Investigation of the effect of the swirler design on the aerodynamic structure of a swirling flow in a cylindrical tube. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya from respublikanskiy mezhvedomstvennyy sbornik*. Minsk, 14, 158–160. (In Russ.).

9. Mustashkin, F.A., Nikolaev, N.A. & Nikolaev, A.M. (1970). Hydrodynamic patterns in a vortex-type mass transfer apparatus. *Tруды Казан. хим.-технол. ин-та*, (45), 26–31. (In Russ.).

10. Sabitov, S.S., Savel'ev, N.I. & Nikolaev, N.A. (1981). Vortex mass transfer devices. *Obshcheotraslevye voprosy razvitiya khimicheskoy promyshlennosti. Obzor. inf. ser. NIITEKhIM*, 3, 30. (In Russ.).

11. Dmitrieva, O.S., Kharkov, V.V. & Nikolaev, A.N. (2024). The dispersed composition of the liquid phase of the vortex separation device. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 27(5), 54–58. (In Russ.). doi: 10.55421/1998-7072_2024_27_5_54.

12. Vyzovkin, E.S. (1972). Investigation of hydrodynamics and efficiency of vortex contact stages. Extended abstract of candidate's thesis. Kazan. (In Russ.).

13. Levdanskiy, E.I. (1973). Investigation of high-speed rectification in devices with direct-flow centrifugal contact devices. *From 3-ya Vses. konf. po teorii i praktike rektifikatsii*. Severodonetsk, (2), 258–261. (In Russ.).

14. 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.).

15. Kharkov, V.V. (2016). Modeling of heat and mass transfer during juice concentration in a vortex chamber. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povelzh'ya*, (1), 37–44. (In Russ.).

16. Ershov, A.I., Gukhman, L.M. & Blyakher, E.G. (1971). Investigation of the hydrodynamics of an ascending two-phase swirling flow. *Izvestiya vuzov SSSR. Energetika*, (10), 88–92. (In Russ.).

17. Lukyanov, V.P. (1976). Hydrodynamic characteristics. *Promyshlennaya i sanitarnaya ochistka gazov*, (5), 6–8. (In Russ.).

18. 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.).

Information about the authors

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

V. V. Kharkov – 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.