

В. В. Харьков, А. О. Маясова, О. С. Дмитриева

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТВОДА ОТСЕПАРИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ С ЛОПАСТЕЙ ЗАВИХРИТЕЛЯ ВИХРЕВОГО УСТРОЙСТВА*Ключевые слова: сепарация капель, лопасть завихрителя, унос жидкости, гидравлическое сопротивление.*

Повышение эффективности разделения многофазных потоков в вихревых сепараторах напрямую связано с решением проблемы вторичного уноса жидкости, который возникает при срыве коалесцированной пленки с лопастей завихрителя. Существующие методы отвода этой пленки часто усугубляют ситуацию, увеличивая гидравлическое сопротивление или способствуя разбрызгиванию. Таким образом, разработка конструкции, обеспечивающей эффективный дренаж при минимальном воздействии на основной поток, является актуальной. Целью данной работы было экспериментальное обоснование работоспособности нового устройства для отвода сепарированной жидкости непосредственно с лопастей аксиального завихрителя за пределы корпуса сепаратора, направленного на снижение вторичного уноса. Методика исследования включала испытания лабораторной модели на системе воздух–вода и растворы глицерина с варьированием скорости газа (15–23 м/с), нагрузки по жидкости (до 300 кг/ч) и кинематической вязкости (1–50 сСт). Конструкция содержит завихритель с шестью лопастями, оснащенными специальными отводящими трубками со щелевым забором. Проведено сравнение с базовым устройством и аналогом по патенту по ключевым параметрам: унос жидкости, гидравлическое сопротивление и комплексный показатель эффективности. В результате подтверждена работоспособность предложенного устройства. Установлено, что доля жидкости, отводимой с лопастей, может достигать 20% от общей нагрузки, слабо зависит от скорости газа, но существенно снижается с ростом вязкости из-за увеличения сопротивления в каналах. Получена эмпирическая зависимость для расчета этого количества. Сравнительный анализ с аналогичными устройствами продемонстрировал, что, несмотря на рост гидравлического сопротивления на 40–45%, новое устройство обеспечивает снижение уноса жидкости на 45–50% и обладает наилучшим комплексным показателем эффективности. Основное преимущество конструкции заключается в устранении вторичного уноса за счет вывода части жидкости из основного потока, что способствует сохранению крутки и улучшает условия окончательной сепарации в устройстве.

V. V. Khar'kov, A. O. Mayasova, O. S. Dmitrieva

EXPERIMENTAL STUDY OF THE REMOVING SEPARATED LIQUID FROM THE SWIRLER BLADES OF A VORTEX DEVICE*Keywords: droplet separation, swirler blade, droplet entrainment, pressure drop.*

Improving the efficiency of multiphase flow separation in vortex separators is directly related to solving the problem of secondary liquid entrainment, which occurs when a coalesced film detaches from the swirler blades. Existing methods for removing this film often exacerbate the situation by increasing the hydraulic resistance or promoting splashing. Therefore, developing a design that provides effective drainage with minimal impact on the main flow is relevant. The aim of this work was the experimental argumentation of the operability of a new device for removing separated liquid directly from the blades of an axial swirler outside the separator casing, aimed at reducing secondary entrainment. The research methodology involved testing a laboratory model on an air-water system and glycerol solutions with variations in gas velocity (15–23 m/s), liquid load (up to 300 kg/h), and kinematic viscosity (1–50 cSt). The design comprised a swirler with six blades equipped with special drainage tubes with a slotted intake. A comparison was made with a base device and a patent analogue based on key parameters: liquid entrainment, pressure drop, and a comprehensive performance coefficient. As a result, the operability of the proposed device was confirmed. It was found that the fraction of liquid removed from the blades can reach up to 20% of the total load, showing little dependence on gas velocity but decreasing significantly with increasing viscosity due to increased channel resistance. An empirical correlation for calculating this amount was obtained. Comparative analysis demonstrated that, despite a 40–45% increase in hydraulic resistance, the new device provides a 45–50% reduction in liquid entrainment and has the best comprehensive performance coefficient. The main advantage of the design lies in eliminating secondary entrainment by diverting part of the liquid from the main flow, which helps preserve the swirl and improves the conditions for final separation within the device.

Введение

Высокая эффективность процесса разделения многофазных потоков – обязательное требование многих технологических процессов в химической и смежных отраслях промышленности. К ним относятся первичная сепарация капельной влаги в системах осушки газа, удаление уноса жидкого абсорбента из парогазовых потоков после абсорберов, предварительная очистка от капельного уноса на выходе ректификационных колонн, а также входные ступени подготовки газов в промышленных энергетических и

перерабатывающих установках [1, 2]. Качество сепарации напрямую влияет на эффективность технологических процессов, коррозионную стойкость оборудования, чистоту конечного продукта и экологические показатели.

Среди аппаратов для высокоэффективного разделения систем газ–жидкость, газ–твердое, газ–жидкость–твердое, жидкость–газ–жидкость широкое применение нашли вихревые сепараторы [3–7]. Их работа основана на сообщении потоку закрутки с помощью завихрителя, что приводит к центробежному

осаждению дисперсной фазы на стенках корпуса. Наибольшее распространение получили аппараты с аксиальными лопастными завихрителями, которые обеспечивают интенсивную закрутку и, одновременно, выступают в качестве контактной поверхности для коалесценции: капли жидкости при инерционном ударе о поверхность лопастей срываются, формируя связную жидкостную пленку [8, 9]. Если эту пленку не отводить, поток срывает ее с кромок лопастей, что приводит к вторичному уносу и снижению степени разделения [10, 11]. Следовательно, управление отводом коалесцированной жидкости с поверхности лопастей – ключевое направление для повышения эффективности вихревых сепараторов [12].

В рамках традиционной компоновки отвод жидкости с лопастей завихрителя можно осуществлять различными способами: отсосом через отверстия во внутренние полости лопастей; установкой на лопастях направляющих дефлекторов, смещающих пленку к периферии устройства; установкой на выходных кромках лопастей сборников с последующим отводом жидкости за пределы сепаратора. Однако применение каждого из этих способов связано с рядом технических проблем. Ключевая из них заключается в противоречии между двумя требованиями: эффективным отводом жидкости и минимальным влиянием дренажной системы на основной поток. Любое устройство на лопасти увеличивает гидравлическое сопротивление и может само стать источником вторичного уноса за счет разбрызгивания. Таким образом, задача повышения эффективности сепаратора включает нахождение конструкции отводящего устройства, обеспечивающей баланс между полной дренажа и минимальным влиянием на гидравлическое сопротивление основного потока [13, 14].

Целью работы является экспериментальное исследование и обоснование работоспособности конструкции по отводу жидкости с лопастей вихревого сепарационного устройства, позволяющей снизить вторичный унос жидкости при минимизации гидравлических потерь.

Методика исследования

Было проведено экспериментальное исследование процесса отвода жидкости с лопастей завихрителя с целью подтверждения работоспособности предлагаемой конструкции вихревого сепарационного устройства в зависимости от различных условий.

Вихревое сепарационное устройство (рис. 1) состоит из корпуса 1, аксиального завихрителя 2, отводчика жидкости 3 и комбинированного узла для отделения жидкой фазы от газовой 4. Завихритель вмонтирован в корпус неподвижно и состоит из лопастей 5 и втулки 6. Лопасти 5 установлены под некоторым углом к оси устройства с перекрытием. На выходной кромке лопастей 5 установлено устройство для отвода жидкости 3 за пределы корпуса, которое представляет собой трубку с разрезом, при этом одна кромка разреза приварена к тыльной стороне лопасти, другая кромка образует щель с фронтальной кромкой, а концы трубок через отверстия выведены

за пределы корпуса. Выходная кромка лопасти введена в разрез, но не доходит до внутренней стенки трубки [15].

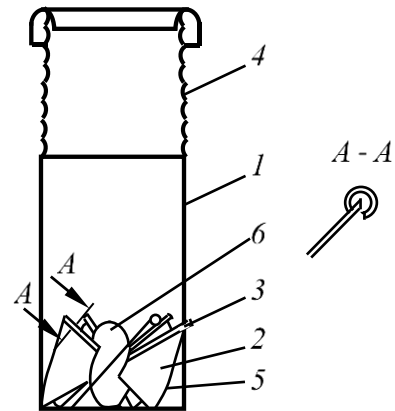


Рис. 1 – Схема вихревого сепарационного устройства с аксиальным завихрителем: 1 – корпус; 2 – завихритель; 3 – отводчик жидкости с лопаток; 4 – узел окончательного разделения фаз; 5 – лопасти завихрителя; 6 – втулка

Fig. 1 – Diagram of a vortex separation device with an axial swirler: 1 – body; 2 – swirler; 3 – fluid drain from the blades; 4 – final phase separation unit; 5 – swirler blades; 6 – hub

Комбинированный узел окончательного разделения жидкости от газовой фазы 4 состоит из перфорированного стакана и расположенного выше торoidalного отсекавателя. Перфорированный стакан представляет собой цилиндр с отверстиями, выполненными методом продавливания стенки изнутри, поэтому края отверстий внутри цилиндра получаются без острых кромок. Конструктивно расположение отверстий на цилиндре выполнено по рекомендациям работы [16], диаметр отверстий составляет 4 мм, а отношение шага между отверстиями и диаметром – 2,5 мм.

Вихревое сепарационное устройство работает следующим образом. Газожидкостный поток, попадая в каналы завихрителя, приобретает винтовое движение. Капли жидкости, имеющие большую массу и инерцию, попадая в каналы завихрителя, продолжают прямолинейное движение, незначительно отклоняясь вместе с газовым потоком. Долетая до фронтальной кромки лопасти, капли ударяются об нее, прилипают к поверхности или отлетают, разбиваясь на более мелкие капли, и увлекаются газовым потоком. Пленка жидкости, образовавшаяся на фронтальной кромке лопасти, также увлекается газовым потоком к выходной кромке лопасти, попадая в щель между кромкой разреза трубки для отвода жидкости и фронтальной кромкой лопасти. Далее отбрасывается в камеру внутри трубки и напором газа жидкость дренируется вдоль трубки, после чего отводится за пределы корпуса. Капли жидкости, отскочившие от поверхности лопасти, проскакивают щель устройства для отвода жидкости и вместе с газовым потоком попадают в зону закрученного потока над завихрителем. Под действием центробежной силы

капли жидкости долетают до внутренней поверхности корпуса и образуют пленку жидкости, которая напором газового потока поднимается по винтовой линии вверх до устройства для отделения жидкой фазы от газовой.

Отверстия перфорированного стакана наполняются жидкостью и не пропускают газовую фазу. По мере накопления жидкости в отверстиях происходит дренирование ее за пределы устройства. При внезапном увеличении расхода жидкой фазы может произойти проскок жидкости до верхней кромки стакана, тогда отделение жидкой фазы от газовой происходит в тороидальном отсекателе. Жидкая фаза, которая не успела дренироваться в перфорированном стакане, попадает в зазор между ним и тороидальным отсекателем и отбрасывается вниз. Вместе с жидкостью в зазор попадает частично газовая фаза и создает снаружи перфорированного стакана для отвода жидкости нисходящий газовый поток, который способствует уменьшению возможности вторичного уноса жидкости, дренированной из стакана.

Отличительной особенностью конструкции сепарационного устройства является то, что в ней использован принцип отвода жидкости, выделившейся на лопастях завихрителя за пределы корпуса. Это способствует уменьшению количества жидкой фазы, движущейся вместе с газовым потоком, и создает благоприятные условия для работы устройства отделения жидкости от газа и уменьшению возможности вторичного уноса выделившейся жидкости.

Завихритель имел шесть лопастей с углом наклона 45° и коэффициентом перекрытия 0,5. Диаметр завихрителя равнялся диаметру сепарационной зоны и был равен 100 мм; диаметр втулки завихрителя был равен 30 мм. Лопастей снабжались устройствами для отвода отсепарированной жидкости диаметром 8 мм с шириной щели от 1 до 3 мм. Для накопления жидкости, отсепарированной на лопастях и выведенной через каналы за пределы рабочей зоны, последний снабжался дополнительной камерой-сборником, откуда жидкость отбиралась в мерную емкость. Количество отсепарированной жидкости определялось весовым способом. Подробное описание экспериментальной установки и методики обработки опытных данных представлены в работе [17].

Из режимных параметров в ходе эксперимента варьировались среднерасходная скорость газа в пределах от 15 до 23 м/с и нагрузка по жидкой фазе от 0 до 300 кг/ч. Исследование проводилось на системе воздух-вода и водные растворы глицерина в диапазоне изменения коэффициента кинематической вязкости от 1 до 50 сСт с целью изучения влияния физических свойств жидкости.

Результаты и обсуждение

Анализ полученных опытных данных (рис. 2) показал, что количество отсепарированной жидкости, отводимое с лопастей завихрителя, слабо зависит от скорости газа, но существенно зависит от вязкости жидкой фазы. С увеличением среднерасходной скорости газа по устройству (характеризуемое числом

Рейнольдса по газу Re_g) количество жидкости незначительно убывает. Данный эффект становится пренебрежимо малым по мере увеличения вязкости жидкой фазы. Как и следовало ожидать, количество отводимой с лопастей жидкости увеличивается с ростом нагрузки по жидкости, что свидетельствует о нормальной работе устройств отвода. Вместе с тем, с увеличением вязкости жидкой фазы количество отсепарированной жидкости уменьшается, так как последняя не успевает стекать по отводящим каналам.

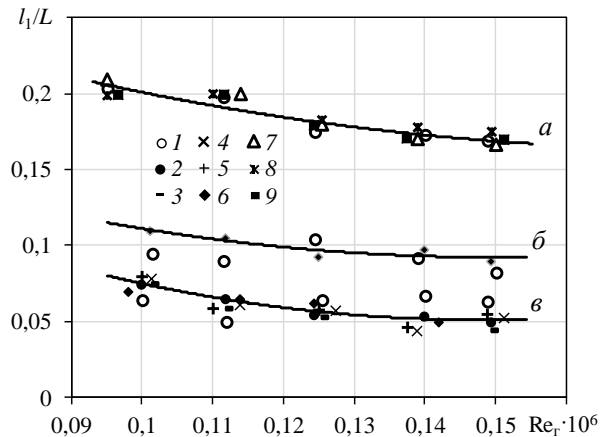


Рис. 2 – Отвод жидкости с лопастей завихрителя, L , кг/ч: 1 – 25; 2 – 50; 3 – 75; 4 – 100; 5 – 125; 6 – 150; 7 – 200; 8 – 250; 9 – 300; $\nu_{ж}$, сСт: а – 1; б – 30; в – 50

Fig. 2 – Discharge of liquid from the swirler blades, L , kg/h: 1 – 25; 2 – 50; 3 – 75; 4 – 100; 5 – 125; 6 – 150; 7 – 200; 8 – 250; 9 – 300; ν_i , sSt: a – 1; б – 30; в – 50

Во всех исследованных случаях доля отсепарированной и отведенной с лопасти жидкости не превышала 20% общей нагрузки устройства. Максимальные значения отвода жидкости наблюдались при минимальной вязкости (1 сСт), тогда как увеличение вязкости до 50 сСт приводило к снижению эффективности дренажа более чем в 2 раза. Визуальное наблюдение за работой устройств отвода жидкости показало, что отсепарированная на лопастях завихрителя жидкость не полностью входит в щель отводящей трубки, переливается через отводящую трубку, дробится и уносится газовым потоком. Это, очевидно, вызвано неравномерностью распределения отсепарированной жидкости вдоль щели отводящего устройства и большим гидравлическим сопротивлением отводящих каналов. В закрученном газовом потоке величина статического давления определяется распределением тангенциальной компоненты вектора скорости по радиусу вихря и увеличивается от центра устройства к периферии, что также отрицательно сказывается на доле отводимой с лопастей завихрителя жидкости.

Попытка увеличить долю отводимой жидкости путем увеличения ширины щели между лопастью и кромкой отводящей трубки не дала положительных результатов. Увеличение размера щели с 1 до 3 мм, и соответственное увеличение диаметра отводящего канала, привело к резкому увеличению гидравлического сопротивления устройства за счет уменьшения

доли живого сечения завихрителя, а большое количество газа, выходящее из отводных трубок, способствовало разбрызгиванию жидкости в камере-сборнике и образованию вторичного уноса.

Обработка опытных данных для узла отвода с шириной щели, равной 1 мм, позволила получить следующую эмпирическую формулу для расчета доли отсепарированной жидкости, отводимой с лопастей завихрителя, в зависимости от режимных параметров и физических свойств среды:

$$l_1/L = 0,174 \exp(-0,021 v_{в}/v_{ж}), \quad (1)$$

где $v_{ж}$ – коэффициент кинематической вязкости жидкой фазы, сСт.

Для доказательства целесообразности введения устройств для отвода жидкости с лопастей завихрителя было проведено сравнительное испытание трех вихревых устройств: 1 – с плосколопастным аксиальным завихрителем; 2 – устройство с центробежным завихрителем по патенту [18]; 3 – исследуемое устройство. Диаметр устройств был равен 100 мм, суммарная длина поперечной сепарации и узла окончательного отделения составила 450 мм. Угол наклона лопастей составлял 45° , коэффициент перекрытия лопастей 0,5, диаметр центральной втулки 30 мм, коэффициент крутки завихрителя базового равнялся 0,71, по патенту и авторскому свидетельству 0,52. Исследования проводились при среднерасходной скорости газа по устройству $W_{ан} = 15-23$ м/с и нагрузке по жидкости $l = 0-0,083$ кг/с.

Анализ экспериментальных данных (рис. 3) по гидравлическому сопротивлению показал, что энергетические потери в устройствах 2 и 3 больше, чем в базовой за счет установки дополнительных элементов, препятствующих движению потока. Причем, сопротивление устройства 2 выше, чем устройства 3, так как в последней обеспечивается более плавное обтекание газовым потоком устройств для отвода жидкости.

Исследование степени очистки газа от жидкой фазы при фиксированной скорости $W_{ан} = 19$ м/с (рис. 4) показало, что введение дополнительных элементов для отвода отсепарированной жидкости позволяет повысить степень разделения газожидкостного потока. Во всех исследованных диапазонах нагрузки унос жидкости из вихревого сепарационного устройства (линия 3) был на 45–50% ниже, чем из базового устройства (линия 1), тогда как альтернативное решение (линия 2) обеспечивало снижение уноса только на 15–20%. Однако отвод жидкости к периферии устройства, примененный в устройстве с центробежным завихрителем (линия 2), не позволяет полностью решить вопрос качественной очистки газа, так как жидкая фаза продолжает совместное движение с газовой фазой и наблюдается вторичный унос жидкости, что исключается в исследуемом устройстве (линия 3), путем отвода части жидкости за пределы корпуса.

При отсутствии орошения гидравлическое сопротивление всех устройств подчиняется квадратичному закону, что соответствует развитому турбулентному течению газа в устройстве. При подаче жидкости гидравлическое сопротивление сепарационных

устройств увеличивается пропорционально отношению нагрузок по фазам.

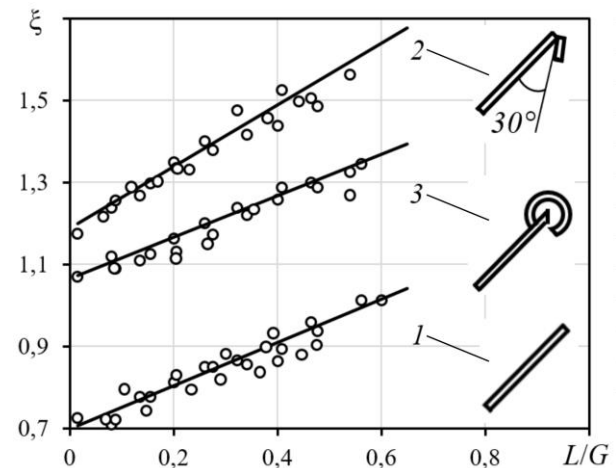


Рис. 3 – Гидравлическое сопротивление сепарационных устройств, вид лопастей завихрителя: 1 – плосколопастной аксиальный завихритель; 2 – по патенту [18]; 3 – исследуемое устройство

Fig. 3 – Pressure drop of the separation devices, view of the swirler blades: 1 – flat-blade axial swirler; 2 – according to the patent [18]; 3 – device under study

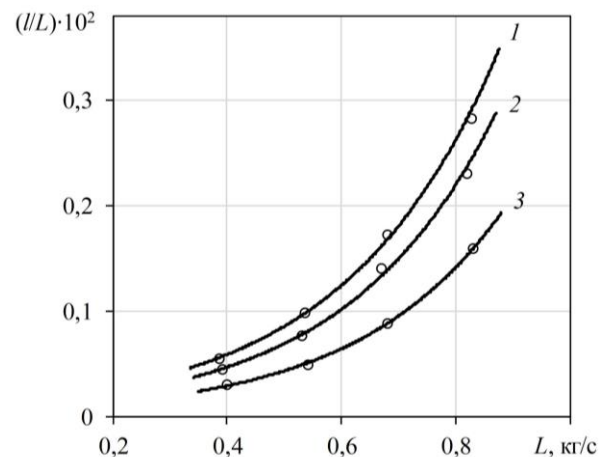


Рис. 4 – Унос жидкой фазы из сепарационных устройств: 1 – плосколопастной аксиальный завихритель; 2 – по патенту [18]; 3 – исследуемое устройство (обозначения вида лопастей по рис. 3)

Fig. 4 – Entrainment of the liquid phase from the separation devices: 1 – flat-blade axial swirler; 2 – according to the patent [18]; 3 – device under study (notation of the type of blades according to Fig. 3)

Как и следовало ожидать, с увеличением нагрузки по жидкости величина уноса во всех трех устройствах нарастает, причем степень нарастания уноса практически одинакова. Для оценки эффективности устройств и их последующего сравнения был введен комплексный показатель:

$$\eta = \frac{l}{G} \xi, \quad (2)$$

где l – унос жидкой фазы; G – расход газа; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления.

Результаты сравнительного анализа устройств, представленные на рис. 5, показывают, что наибольшей эффективностью обладает устройство 3 с дополнительным устройством для отвода сепарированной жидкости за пределы корпуса. По показателю комплексной эффективности значение η для устройства 3 составляло 0,55–0,62, что на 40–45% ниже, чем для устройства 2 и демонстрирует оптимальный баланс между дренажом жидкости с лопастей и гидравлическими потерями. Эффективность устройства 2 даже меньше, чем у базового устройства 1, вследствие высоких гидравлических потерь, которые не компенсируются улучшением качества сепарации.

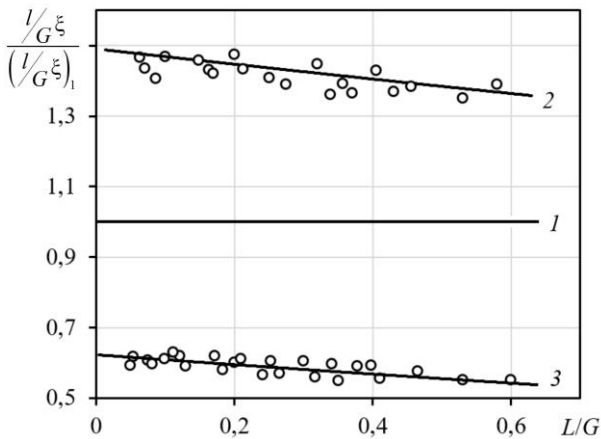


Рис. 5 – Сравнение сепарационных устройств по эффективности: 1 – плосколопастной аксиальный завихритель; 2 – по патенту [18]; 3 – исследуемое устройство (обозначения вида лопастей по рис. 3)

Fig. 5 – Comparison of separation devices by efficiency complex η : 1 – flat-blade axial swirler; 2 – according to the patent [18]; 3 – device under study (notation of the type of blades according to Fig. 3)

В целом, отвод отсепарированной жидкости с лопастей завихрителя, путем установки дополнительного элемента обтекаемой формы, приводит к повышению эффективности сепарации. Эффект повышения степени разделения обусловлен отводом отсепарированной жидкости с лопастей завихрителя (20% всей массы жидкости, поступающей в устройство) и, как следствие, более полным сохранением крутки потока, уменьшением величины первичного и вторичного уноса.

Заключение

1. Экспериментально подтверждена работоспособность конструкции вихревого сепарационного устройства с отводом жидкости с лопастей завихрителя за пределы корпуса.
2. Установлено, что доля отводимой жидкости не превышает 20% от общей нагрузки и слабо зависит от скорости газа, но существенно снижается с ростом вязкости жидкости (более чем в 2 раза при изменении вязкости от 1 до 50 сСт), что объясняется увеличением гидравлического сопротивления дренажа.

3. Получена эмпирическая зависимость, позволяющая рассчитать количество отводимой жидкости в зависимости от режимных параметров и вязкости.
4. Проведенный сравнительный анализ трех сепарационных устройств показал, что предложенная конструкция имеет наибольшую эффективность, характеризуемую минимальным значением комплексного показателя. Несмотря на увеличение гидравлического сопротивления на 40–45% по сравнению с базовым устройством, она обеспечивает снижение уноса жидкости на 45–50%.
5. Основное преимущество предложенной конструкции вихревого устройства обусловлено исключением вторичного уноса отсепарированной на лопастях жидкости за счет ее вывода за пределы корпуса.

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).

Литература

1. L. Yang, X. Chen, C. Huang, S. Liu, B. Ning, K. Wang, *Chem. Eng. Res. Des.*, **201**, 257-274 (2024). DOI: 10.1016/j.cherd.2023.11.057.
2. Z. Qiu, L. Zhou, L. Bai, M.A. El-Emam, R. Agarwal, *Geoenery Science and Engineering*, **233**, 212577 (2024). DOI: 10.1016/j.geoen.2023.212577.
3. V. Zinurov, A. Dmitriev, V. Kharkov, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, 378-385 (2021). DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_44.
4. И.С. Литвяков, Э.Г. Теляшев, *Электронный научный журнал Нефтегазовое дело*, **1**, 171-190 (2025). DOI: 10.17122/ogbus-2025-1-171-190.
5. В.В. Казаков, А.А. Костомахин, А.С. Жихарев, А.М. Кутепов, *ТОХТ*, **27**, 1, 69-72 (1993).
6. Р.Р. Шафиков, Л.Н. Шагаев, Э.В. Гарифуллина, В.В. Бронская, *Вестник технологического университета*, **27**, 8, 104-108 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_8_104.
7. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, И.И. Насырова, О.С. Дмитриева, *Вестник технологического университета*, **25**, 4, 71-76 (2022). DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_4_71.
8. R. Kang, Z. Xiong, J. Liu, S. Wang, *Sep. Purif. Technol.*, **379**, Part 3, 134996 (2025). DOI: 10.1016/j.seppur.2025.134996.
9. Н.А. Войнов, А.Н. Николаев, Д.В. Тароватый, А.В. Кустов, *Химическая промышленность*, **85**, 3, 142-146 (2008).
10. А.А. Бузов, *Наука и техника в газовой промышленности*, 3-4, 88-95 (2004).
11. А.С. Жихарев, О.А. Черепанова, *Известия МГТУ*, **4**, 1 (15) 86-89 (2013).
12. L. Mao, N. Gui, Y. Sun, X. Yang, S. Jiang, *Nuclear Engineering and Technology*, **58**, 3, 104025 (2026). DOI: 10.1016/j.net.2025.104025.
13. P. Wang, L. Wan, J. Tu, X. Zhang, X. Luo, Z. Tang, W. Zhao, *Chem. Eng. Sci.*, **310**, 121565 (2025). DOI: 10.1016/j.ces.2025.121565.
14. V.E. Zinurov, V.V. Kharkov, I.N. Madyshev, *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 10-1, 173-181 (2022). DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_173.

15. Р.К. Диаров, А.А. Овчинников, Н.А. Николаев, М.Ш. Фаттахов. Авт. свид. СССР 835468 (1981).
16. С.С. Сабитов. Дисс. канд. техн. наук, КХТИ, Казань, 1979. 161 с.
17. O.S. Dmitrieva, V.V. Kharkov, A.N. Nikolaev, *Theor. Found. Chem. Eng.*, **58**, 1755-1759 (2024). DOI: 10.1134/S0040579525601165.
18. R. Eads, C.L. Campbell. Pat. USA 3995934 (1975).
7. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, I.I. Nasyrova, O.S. Dmitrieva, *Herald of Technological University*, **25**, 4, 71-76 (2022). DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_4_71.
8. R. Kang, Z. Xiong, J. Liu, S. Wang, *Sep. Purif. Technol.*, **379**, Part 3, 134996 (2025). DOI: 10.1016/j.seppur.2025.134996.
9. N.A. Vojnov, A.N. Nikolaev, D.V. Tarovatyj, A.V. Kustov, *Khimicheskaya promyshlennost'*, **85**, 3, 142-146 (2008).
10. A.A. Buzov, *Nauka i tekhnika v gazovoj promyshlennosti*, 3-4, 88-95 (2004).
11. A.S. Zhiharev, O.A. Cherepanova, *Izvestiya MGTU*, **4**, 1 (15) 86-89 (2013).
12. L. Mao, N. Gui, Y. Sun, X. Yang, S. Jiang, *Nuclear Engineering and Technology*, **58**, 3, 104025 (2026). DOI: 10.1016/j.net.2025.104025.
13. P. Wang, L. Wan, J. Tu, X. Zhang, X. Luo, Z. Tang, W. Zhao, *Chem. Eng. Sci.*, **310**, 121565 (2025). DOI: 10.1016/j.ces.2025.121565.
14. V.E. Zinurov, V.V. Kharkov, I.N. Madyshev, *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 10-1, 173-181 (2022). DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_173.
15. R.K. Diarov, A.A. Ovchinnikov, N.A. Nikolaev, M.Sh. Fattahov. Avt. свид. USSR 835468 (1981).
16. S.S. Sabitov. Diss. kand. tekhn. nauk, KKhTI, Kazan, 1979. 161 p.
17. O.S. Dmitrieva, V.V. Kharkov, A.N. Nikolaev, *Theor. Found. Chem. Eng.*, **58**, 1755-1759 (2024). DOI: 10.1134/S0040579525601165.
18. R. Eads, C.L. Campbell. Pat. USA 3995934 (1975).

References

1. L. Yang, X. Chen, C. Huang, S. Liu, B. Ning, K. Wang, *Chem. Eng. Res. Des.*, **201**, 257-274 (2024). DOI: 10.1016/j.cherd.2023.11.057.
2. Z. Qiu, L. Zhou, L. Bai, M.A. El-Emam, R. Agarwal, *Geoenery Science and Engineering*, **233**, 212577 (2024). DOI: 10.1016/j.geoen.2023.212577.
3. V. Zinurov, A. Dmitriev, V. Kharkov, *Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer*, 378-385 (2021). DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_44.
4. I.S. Litvyakov, E.G. Telyashev, *Elektronnyj nauchnyj zhurnal Neftegazovoe delo*, 1, 171-190 (2025). DOI: 10.17122/ogbus-2025-1-171-190.
5. V.V. Kazakov, A.A. Kostomahin, A.S. Zhiharev, A.M. Kutepov, *Teoreticheskie osnovy teplotekhniki*, **27**, 1, 69-72 (1993).
6. R.R. Shafikov, L.N. Shagaev, E.V. Garifullina, V.V. Bronskaya, *Herald of Technological University*, **27**, 8, 104-108 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_8_104.

©**В. В. Харьков** – к.т.н., доцент кафедры Оборудования пищевых производств (ОПП), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, v.v.kharkov@gmail.com; **А. О. Маясова** – старший преподаватель кафедры Машин и Аппаратов Химических Производств, КНИТУ, mayasova-fwoq@yandex.ru; **О. С. Дмитриева** – к.т.н., доцент кафедры ОПП, КНИТУ, ja_deva@mail.ru.

©**V. V. Khar'kov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Department of Food Production Equipment (FPE), Kazan National research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, v.v.kharkov@gmail.com; **A. O. Mayasova** – Senior Lecturer, Department of Machines and Apparatus for Chemical Production, KNRTU, mayasova-fwoq@yandex.ru; **O. S. Dmitrieva** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, the FPE department, KNRTU, ja_deva@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 03.12.25.

Дата принятия рукописи в печать – 08.04.26.