



СТРУКТУРА ПОТОКА НЕСУЩЕЙ ФАЗЫ В МУЛЬТИВИХРЕВОМ СЕПАРАТОРЕ ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Максим Олегович Уткин ¹, Виталий Викторович Харьков ²,
Гузель Рамилевна Бадретдинова ³, Андрей Владимирович Дмитриев ⁴

^{1, 3, 4} Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

¹ 209maks@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9990-1412>

³ nice.badretdinova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>

⁴ ieremiada@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>

² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия, v.v.kharkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

Аннотация. Для использования природного газа непосредственно на площадках по нефтегазодобыче в газовых генераторах требуется его предварительная очистка. Предложена конструкция мультिवихревого сепаратора для очистки природного газа от дисперсных частиц. Предлагается установка данного устройства на коллекторе подачи добываемого газа. Особенностью конструкции является цилиндрическая труба с отверстиями, формирующая с корпусом устройства межтрубное пространство, где создается вихревое течение газа. Такая организация движения газа в устройстве способствует процессу сепарации частиц под действием центробежных сил даже при малых скоростях газа. Значение центробежной силы определяется тангенциальной скоростью, которая, в свою очередь, определяется скоростью прохода газа через отверстия. Соотношение расхода потока газа, проходящего через отверстия, к общему расходу является параметром, который сложно предсказать аналитически. Целью работы является численное исследование структуры течения несущей газовой фазы в разработанном устройстве. Были получены зависимости для составляющих скорости газа в мультिवихревом сепараторе и соотношение расходов потоков газа в проточной части устройства. Построена безразмерная зависимость профиля скоростей от относительной высоты зоны отверстий на внутренней трубе сепаратора. Определена зависимость для расчета гидравлического сопротивления от входной скорости газа и геометрических параметров устройства. Найдено, что гидравлическое сопротивление устройства не зависит от количества рядов отверстий на внутренней трубе. Полученные зависимости позволят определить траекторию движения дисперсных частиц в межтрубном пространстве разработанного мультिवихревого сепаратора при очистке природного газа.

Ключевые слова: сепарация, очистка газа, вихри, профили скорости.

Для цитирования: Структура потока несущей фазы в мультिवихревом сепараторе для улавливания частиц из природного газа / М. О. Уткин [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С. 207–214. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.026. EDN: <https://elibrary.ru/UXUAJA>.

Original article

CARRIER PHASE FLOW IN MULTIVORTEX SEPARATOR FOR COLLECTING PARTICLES FROM NATURAL GAS

Maxim O. Utkin ¹, Vitaly V. Kharkov ², Guzel R. Badretdinova ³,
Andrey V. Dmitriev ⁴

^{1, 3, 4} Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

¹ 209maks@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9990-1412>

³ nice.badretdinova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>

⁴ ieremiada@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>

² Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI, Kazan, Russia,
v.v.kharkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

Abstract. To use natural gas directly in the oil and gas fields in gas generators, it must be previously purified. The design of a multivortex separator to clean natural gas from dispersed particles is proposed. The device is suggested to be installed on a collector for gas recovery. The feature of the structure is a cylindrical pipe with holes, which forms a tubular space between the body of the device, where a vortex gas flow occurs. This gas flow structure in the device provides the process of particle separation by centrifugal forces even at low gas velocities. The centrifugal force value is determined by the tangential velocity, which in turn is determined by the gas velocity through the holes. The ratio of the flow rate through the holes to the total flow is a parameter that is difficult to predict analytically. The work aims to study numerically the structure of the carrier gas flow in the developed device. Dependencies for the gas velocity components in the multivortex separator and the gas flow ratio in the flow part of the device are obtained. The dimensionless dependence of the velocity profile on the hole relative height of the zone in the internal tube of the separator is determined. The dependence is found on the pressure drop against the gas inlet velocity and geometric parameters of the device. The pressure drop of the device is determined to not depend on the number of rows of holes in the internal tube. The obtained dependencies make it possible to determine the trajectory of dispersed particles in the intertube space of the developed multivortex separator during natural gas purification.

Keywords: separation, gas cleaning, vortices, velocity profiles.

For citation: Utkin, M.O., Kharkov, V.V., Badretdinova, G.R. & Dmitriev, A.V. (2023). Carrier phase flow in multivortex separator for collecting particles from natural gas. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 207-214. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.026. EDN: <https://elibrary.ru/UXUAJA>.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие топливно-энергетического комплекса Российской Федерации требует ввода в эксплуатацию новых площадей по добыче нефти и газа. В случае применения газовых генераторов для организации стабильного электропитания постоянной нагрузки возможно непосредственное использование добываемого газа в качестве топлива после предварительной сепарации и редуцирования. Для этого необходима установка фильтров-сепараторов на газовом коллекторе, а также дополнительного блока редуцирования, снижающего давление газа, отобранного с коллектора, до нормального рабочего давления энергетической установки.

В области газовой сепарации накоплено множество экспериментальных и теоретиче-

ских данных. Анализ работы различных устройств для сепарации частиц из природного газа представлен в работе [1]. Авторы [2] предложили компоновочное решение – комбинированную конструкцию центробежного сепаратора для подготовки природного газа с долей попутного нефтяного газа. Осаждение частиц там происходит при турбулентной миграции частиц.

Среди сепараторов отдельным классом являются устройства, использующие в качестве движущей силы центробежную силу, например, циклоны. Эффективность циклонов сильно зависит от размера частиц. Они считаются низкоэффективными сепараторами, особенно для частиц размером менее 5–10 мкм в диаметре [3, 4].

Авторы работы [5] предлагают использовать осевой циклон для улавливания вос-

СТРУКТУРА ПОТОКА НЕСУЩЕЙ ФАЗЫ В МУЛЬТИВИХРЕВОМ СЕПАРАТОРЕ ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА

кообразного компонента, так как эффективность разделения может достигать 95 % при подходящих условиях эксплуатации. Для повышения эффективности удаления мелких капель (менее 20 мкм) был предложен новый лопастной сепаратор с канавками для использования в процессах очистки природного газа [6]. Также интересная конструкция предложена авторами работы [7]. При достижении тангенциальной скорости потока значения 20 м/с, эффективность разделения может быть выше 94 %. В работах [5, 8] доказано, что методы вычислительной гидродинамики (CFD) оказались полезным инструментом для изучения потоков газа и частиц в циклонных сепараторах.

Сверхзвуковой вихревой сепаратор используется для обработки природного газа с целью конденсации и отделения воды и тяжелых углеводородов. Это компактное трубчатое сепараторное устройство без движущихся частей обеспечивает высокую надежность и доступность [9–11]. В работе [12] получены траектории частиц с учетом процесса конденсации, распределения конденсированных капель по размерам при наличии процессов завихрения, зарождения и роста во время дегидратации богатого метаном природного газа внутри сопла Лавалья для различных углов диффузора.

Кроме того, существующие конструкции, используемые для повышения производительности сепараторов, часто сталкиваются с трудностями при изготовлении и высокими эксплуатационными расходами [13, 14]. В настоящее время сложные конструкции можно изготавливать с помощью 3D печати. Таким образом, был изготовлен сепаратор с направляющими лопастями [15]. Примерно четверть от диаметра трубы занимает смесь из песка, конденсата, воды и различных углеводородов, находящихся в жидком состоянии.

Таким образом, разработка новых эффективных устройств для сепарации частиц из природного газа является актуальной. Авторы предлагают установку мультिवихревого сепаратора на газовом коллекторе для улавливания дисперсных частиц из природного газа. Предлагаемое устройство обладает рядом преимуществ:

- в нем создаются вихри малого диаметра даже при малых скоростях газа;
- возникают значительные центробежные силы при небольшом гидравлическом сопротивлении устройства;
- расстояние, которое частицам необходимо преодолеть до стенок устройства, на порядок меньше, чем в циклонах;

- в маленьких вихрях течение практически ламинарное, что упрощает движение частиц к стенкам;

- в пространстве между вихрями и стенками образуются каналы, по которым капли, образуя пленку, могут перемещаться вниз;

- устройство достаточно простое по конструкции, не требует специального инструмента для изготовления.

Целью работы является численное исследование структуры течения несущей фазы в мультिवихревом сепараторе для очистки природного газа.

МЕТОДЫ

Мультिवихревой сепаратор (рис. 1) представляет собой две трубы, одна из которых расположена внутри другой. Внешняя труба является корпусом устройства. Внутренняя труба заглушена сверху, а в нижней части цилиндрической поверхности имеются отверстия. Отверстия выполнены таким образом, чтобы поток при проходе через них разделялся на две части, образуя два противоположно-направленных вихря. Каждое соседнее отверстие также разбивает поток с образованием двух вихрей. Соседние вихри в точках по линии соприкосновения друг с другом имеют одинаковые скорости, поддерживая вращение друг друга.

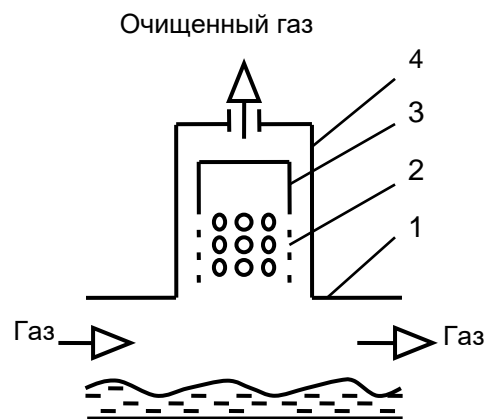


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки мультिवихревого сепаратора: 1 – труба газового коллектора; 2 – отверстия; 3 – внутренняя труба; 4 – корпус устройства

Figure 1 - Schematic diagram of installation of the multivortex separator: 1 - gas pipeline, 2 - holes, 3 - internal pipe, 4 - body of separator

Оценочная методика расчета эффективности схожего по принципу действия устройства представлена в работах [16, 17]. Однако в рассматриваемой конструкции имеется

важная особенность. Значение центробежной силы определяется тангенциальной скоростью, которая, в свою очередь, определяется скоростью прохода газа через отверстия. Соотношение расхода потока газа, проходящего через отверстия к общему расходу, является параметром, который сложно предсказать аналитически.

Численное моделирование проводилось на трехмерной модели мультивихревого сепаратора (рис. 2) со следующими геометрическими размерами: внутренний диаметр внешней трубы 100 мм, диаметр внутренней трубы 76×2 мм, диаметр отверстий 12 мм, расстояние от нижнего края внутренней трубы до центров отверстий первого ряда 7 мм, расстояние между центрами отверстий в рядах 13 мм. Количество рядов отверстий варьировалось в диапазоне от 2 до 6. Расстояние от нижней части внутренней трубы до нижней части внешней трубы 100 мм. Общая высота исследуемого устройства 300 мм. Высота внутренней трубы 100 мм.



Рисунок 2 – Трехмерный вид внутренней трубы с отверстиями

Figure 2 - 3D of the perforated internal tube

Расчеты проводились при использовании модели турбулентности SST k- ω , так как она показала хорошую сходимость с экспериментальными данными в предыдущих исследованиях схожих по принципу действия конструкций [18]. Влиянием шероховатости поверхности стенок можно пренебречь. В качестве текучей среды был воздух при температуре 20 °С и давлении, близком к атмосферному. В верхней части устройства задавался объемный расход газа на выходе, который варьировался в диапазоне от 0,000833 до 0,21 м³/с. В нижней части устройства (на его входе) задавалось атмосферное давление.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате численных расчетов было найдено, что вихри почти не образуются на уровне отверстий. Устойчивая вихревая структура образуется на небольшой высоте от отверстий, даже при малых значениях скорости на входе в устройство (рис. 3). На расстоянии 20 мм от верхней точки внутренней трубы вихревая структура становится неупорядоченной. Возможно, это связано с отсутствием диска с отверстиями и вхождением вихрей в открытое пространство.



Рисунок 3 – Вихри, создающиеся в пространстве между трубами

Figure 3 - Vortices created in the space between tubes

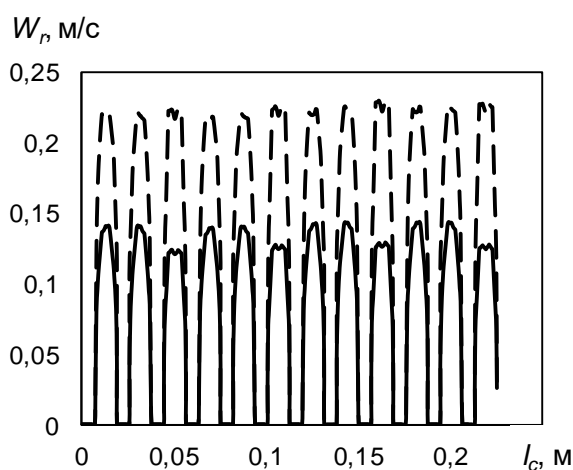


Рисунок 4 – Распределение радиальной скорости движения газа W_r через отверстия. Сплошная линия – первый ряд отверстий, пунктирная линия – второй ряд отверстий

Figure 4 - Radial gas velocity W_r profile through holes. The solid line is the first row of holes, the dotted line is the second row of holes

СТРУКТУРА ПОТОКА НЕСУЩЕЙ ФАЗЫ В МУЛЬТИВИХРЕВОМ СЕПАРАТОРЕ ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА

На рисунке 4 можно отметить 12 пиков для радиальной скорости газа, что соответствует количеству отверстий на внутренней трубе. Значения скорости газа через первый ряд отверстий колеблются в диапазоне 15 %. Во втором ряду расход газа через отверстия значительно более равномерный. При исследовании конструкций с большим числом рядов отверстий выявлено, что расход газа через них практически одинаковый.

Наибольшие колебания осевой скорости газа наблюдаются в непосредственной близости от стенок внутренней трубы (рис. 5), значения могут отличаться на 60 %. На расстоянии 0,83 от радиуса внутренней трубы колебания значительно снижаются, и на расстоянии 0,72 становятся малозаметными.

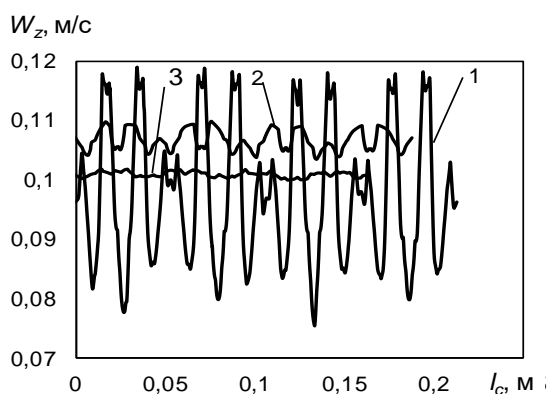


Рисунок 5 – Распределение осевой скорости газа W_z на входе во внутреннюю трубу. Относительный радиус окружности, на котором фиксировались значения осевой скорости: 1 – 0,94; 2 – 0,83; 3 – 0,72

Figure 5 - Axial gas velocity W_z at the inlet to the internal pipe under different relative diameter of the circle, on which the values were fixed: 1 - 0.94; 2 - 0.83; 3 - 0.72

Если рассмотреть распределение осевой скорости движения газа на входе во внутреннюю трубу по радиусу при различных значениях его объемного расхода, то можно заметить, что профиль существенно отличается от профиля скоростей при движении в трубе круглой формы (рис. 6). По краям наблюдаются ярко выраженные локальные максимумы, причем их расположение практически не зависит от входной скорости. Осреднение значений осевых скоростей проводилось по длине окружностей.

Зависимости гидравлического сопротивления от скорости на входе при изменении количества рядов отверстий во внутренней трубе от 2 до 6 полностью совпали (рис. 7).

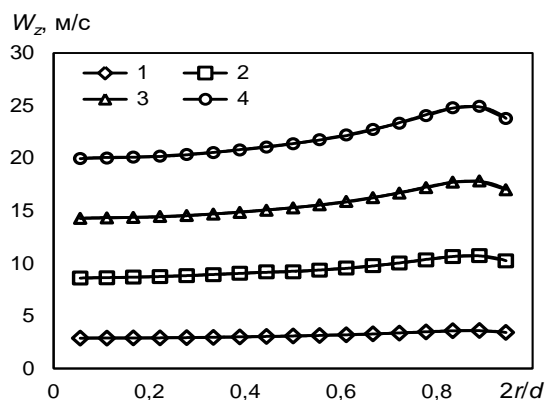


Рисунок 6 – Распределение осевой скорости движения газа W_z на входе во внутреннюю трубу по радиусу $2r/d$ при различных значениях его объемного расхода, $\text{м}^3/\text{с}$: 1 – 0,03; 2 – 0,09; 3 – 0,15; 4 – 0,21

Figure 6 - Axial gas velocity W_z at the inlet to the internal pipe along the radius $2r/d$ at different values of gas volume flow rate, m^3/s : 1 - 0.03; 2 - 0.09; 3 - 0.15; 4 - 0.21

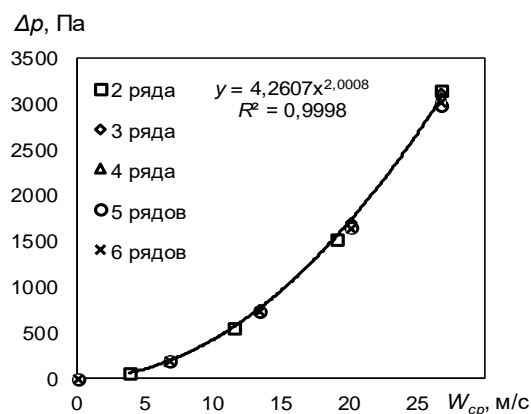


Рисунок 7 – Зависимость гидравлического сопротивления устройства Δp от входной скорости газа W_{cp}
Figure 7 - Pressure drop of the device Δp versus the inlet gas velocity W_{av}

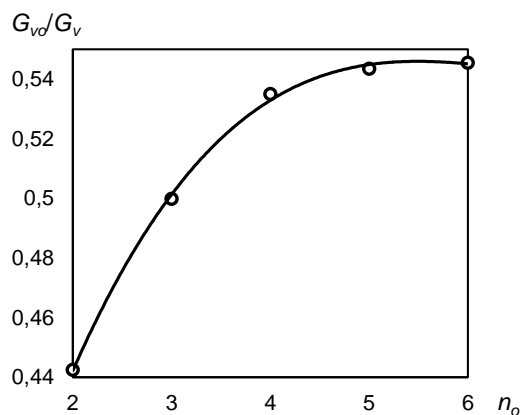


Рисунок 8 – Зависимость относительного расхода G_{vo}/G_v от количества рядов отверстий n_o

Figure 8 - Relative flow rate G_{vo}/G_v versus the number of rows of holes n_o

Соотношение расходов существенно зависит от общего расхода газа только при количестве рядов отверстий меньше 4 (рис. 8). При большем числе рядов соотношение примерно равно 0,54.

Анализ профилей скорости выхода газа через ряды отверстий показал, что существует безразмерная зависимость профиля скоростей от относительной высоты зоны отверстий (рис. 9).

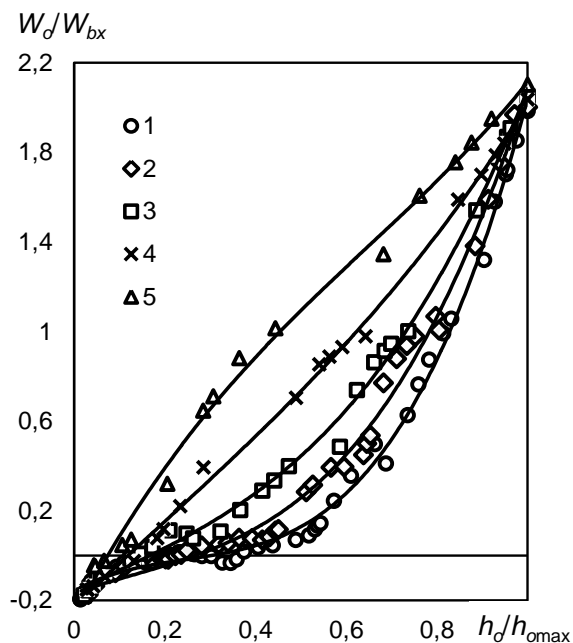


Рисунок 9 – Распределение относительной скорости W_o/W_{bx} по относительной высоте h_o/h_{max} в зависимости от количества отверстий n_o : 1 – 6; 2 – 5; 3 – 4; 4 – 3; 5 – 2

Figure 9 - Relative velocity W_o/W_{bx} versus relative height h_o/h_{max} depending on the number of rows of holes n_o : 1 - 6; 2 - 5; 3 - 4; 4 - 3; 5 - 2

Можно заключить, что тангенциальная скорость в вихрях, образующихся в кольцевом пространстве сепаратора, не зависит от количества отверстий, а определяется лишь скоростью газа на входе в устройство. Расположение отверстий влияет лишь на распределение потока газа через отверстия.

При обработке результатов получены коэффициенты для зависимости вида:

$$\frac{W_o}{W_{o_{max}}} = a \left(\frac{h_o}{h_{o_{max}}} \right)^3 + b \left(\frac{h_o}{h_{o_{max}}} \right)^2 + c \left(\frac{h_o}{h_{o_{max}}} \right) + d.$$

Значения коэффициентов a, b, c, d в зависимости от числа рядов отверстий, полученные при значении коэффициента детерминации более 0,99, в виде цифр представ-

лены в таблице 1, а в виде графика на рисунке 10.

Таблица 1 – Значения коэффициентов a, b, c, d
Table 1 - The coefficients a, b, c, d

n_o	a	b	c	d
2	1,5271	-2,9851	3,8349	-0,2695
3	0,6768	-0,3667	1,9323	-0,2251
4	1,6038	-0,3466	0,9848	-0,1621
5	2,5242	-0,9836	0,7134	-0,1682
6	4,2810	-3,1675	1,0830	-0,1559

Аномальные значения коэффициентов получаются только при двух рядах отверстий (рис. 10). В остальных случаях коэффициенты либо монотонно возрастают, либо монотонно убывают.

В предлагаемом устройстве создаются большие центробежные силы при относительно небольших значениях скорости газа. Например, для создания фактора разделения, как у сверхцентрифуги, равного 3500, необходимо создать скорость движения газа в отверстиях 14,35 м/с, что соответствует скорости газа на входе в устройство 6,77 м/с. При этом гидравлическое сопротивление устройства составит менее 200 Па.

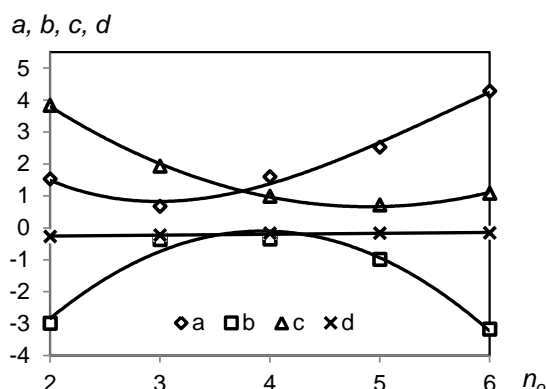


Рисунок 10 – Значения коэффициентов a, b, c, d в зависимости от числа рядов отверстий n_o

Figure 10 - The coefficients a, b, c, d versus the number of rows of holes n_o

В дальнейшем необходимо исследовать эффективность сепарации частиц при рабочих технологических параметрах при условии образования стекающей пленки на стенках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе численного моделирования течения газа в разработанной конструкции мультивихревого сепаратора для улавлива-

СТРУКТУРА ПОТОКА НЕСУЩЕЙ ФАЗЫ В МУЛЬТИВИХРЕВОМ СЕПАРАТОРЕ ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА

ния дисперсных частиц из природного газа можно сделать следующие выводы:

- полученные зависимости скорости позволят определить тангенциальную скорость вихрей и, следовательно, решить уравнения движения капель в пространстве между трубами;
- получена зависимость для расчета гидравлического сопротивления от некоторых геометрических размеров и скорости;
- выявлено, что гидравлическое сопротивление устройства не зависит от количества рядов отверстий на внутренней трубе;
- полученное соотношение расходов потоков газа в проточной части устройства позволит рассчитать осевую компоненту скорости в зоне вихрей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чумаченко Д.А., Колесников И.Н. Анализ эффективности пылеуловителей для природного газа // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2017. № 1. С. 25–30.
2. Ozherelev D.A., Shalai V.V., Ridel I.A. Study of the operating efficiency of centrifugal separators for gas preparation // Proc. High. Educ. Institutions. Machine Build. 2022. № 9 (750). P. 63–72. doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-63-72.
3. Wasilewski M. Analysis of the effect of counter-cone location on cyclone separator efficiency // Sep. Purif. Technol. 2017. Vol. 179. P. 236–247. doi: 10.1016/j.seppur.2017.02.012.
4. Numerical and experimental investigation on a downhole gas-liquid separator for natural gas hydrate exploitation / W. Lan [et al.] // J. Pet. Sci. Eng. 2022. Vol. 208. P. 109743. doi: 10.1016/j.petrol.2021.109743.
5. Chen X., Yu J., Zhang Y. The use of axial cyclone separator in the separation of wax from natural gas: A theoretical approach // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 2615–2624. doi: 10.1016/j.egy.2021.05.006.
6. Wang J., Ji Z., Liu Z. Experimental and numerical investigation on the gas-liquid separation performance of a novel vane separator with grooves // Chem. Eng. Res. Des. 2022. Vol. 180. P. 306–317. doi: 10.1016/j.cherd.2021.12.049.
7. A novel horizontal gas-liquid pipe separator for wet gas based on the phase-isolation / Y. Yang [et al.] // Chem. Eng. Res. Des. 2022. Vol. 178. P. 315–327. doi: 10.1016/j.cherd.2021.12.021.
8. On the effect of the nozzle design on the performances of gas-liquid cylindrical cyclone separators / R. Hreiz [et al.] // Int. J. Multiph. Flow. 2014. Vol. 58. P. 15–26. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.08.006.
9. Wen C., Cao X., Yang Y. Swirling flow of natural gas in supersonic separators // Chem. Eng. Process. Process Intensif. 2011. Vol. 50, № 7. P. 644–649. doi: 10.1016/j.cep.2011.03.008.
10. Ghorbanian K., AminiMagham M. Swirl intensity as a control mechanism for methane purification in supersonic gas separators // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2020. Vol. 83. P. 103572. doi: 10.1016/j.jngse.2020.103572.
11. Wang Y., Yu Y., Hu D. Experimental investigation and numerical analysis of separation performance for supersonic separator with novel drainage structure and reflux channel // Appl. Therm. Eng. 2020. Vol. 176. P. 115111. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115111.
12. Rajaei Shooshtari S.H., Shahsavand A. Numerical investigation of water droplets trajectories during natural gas dehydration inside supersonic separator // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2018. Vol. 54. P. 131–142. doi: 10.1016/j.jngse.2018.03.013.
13. Xu Y., Yang Z., Zhang J. Study on performance of wave-plate mist eliminator with porous foam layer as enhanced structure. Part I: Numerical simulation // Chem. Eng. Sci. 2017. Vol. 171. P. 650–661. doi: 10.1016/j.ces.2017.05.031.
14. Enhanced water collection of bio-inspired functional surfaces in high-speed flow for high performance demister / S.W. Kim [et al.] // Desalination. 2020. Vol. 479. P. 114314. doi: 10.1016/j.desal.2020.114314.
15. Gas-solid separation performance and structure optimization in 3D printed guide vane cyclone separator / C. Han [et al.] // Adv. Powder Technol. 2022. Vol. 33, № 11. P. 103815. doi: 10.1016/j.apt.2022.103815.
16. Cleaning Air Streams from Fine Particles in Paint Booths / R.Y. Bikkulov [et al.] // Ecol. Ind. Russ. 2021. Vol. 25, № 12. P. 10–14. doi: 10.18412/1816-0395-2021-12-10-14.
17. Разработка классификатора с соосно расположенными трубами для разделения сыпучего материала на основе силикагеля / М.Э. Зинуров [и др.] // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 205–211. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.029.
18. Numerical Study of Vortex Flow in a Classifier with Coaxial Tubes / V. Zinurov [et al.] // Int. J. Eng. Technol. Innov. 2022. Vol. 12, № 4. P. 336–346. doi: 10.46604/ijeti.2022.9568.

Информация об авторах

М. О. Уткин – аспирант кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета.

В. В. Харьков – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева–КАИ.

Г. Р. Бадретдинова – аспирант, ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета.

А. В. Дмитриев – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета.

REFERENCES

1. Chumachenko, D.A. & Kolesnikov, I.N. (2017). Analysis of the efficiency of dust collectors for natural gas. *Urban planning. Infrastructure. Communications*, 1, 25-30. (In Russ.).
2. Ozherelev, D.A., Shalai, V.V. & Ridel, I.A. (2022). Study of the operating efficiency of centrifugal separators for gas preparation. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 9 (750), 63-72. doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-63-72.
3. Wasilewski, M. (2017). Analysis of the effect of counter-cone location on cyclone separator efficiency. *Separation and Purification Technology*, 179, 236-247. doi: 10.1016/j.seppur.2017.02.012.
4. Lan, W., Wang, H., Li, Y., Feng, K., Zhang, X., Liu, Y., Zhu, X. & Chen, S. (2022). Numerical and experimental investigation on a downhole gas-liquid separator for natural gas hydrate exploitation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109743. doi: 10.1016/j.petrol.2021.109743.
5. Chen, X., Yu, J. & Zhang, Y. (2021). The use of axial cyclone separator in the separation of wax from natural gas: A theoretical approach. *Energy Reports*, 7, 2615-2624. doi: 10.1016/j.egy.2021.05.006.
6. Wang, J., Ji, Z. & Liu, Z. (2022). Experimental and numerical investigation on the gas-liquid separation performance of a novel vane separator with grooves. *Chemical Engineering Research and Design*, 180, 306-317. doi: 10.1016/j.cherd.2021.12.049.
7. Yang, Y., Ha, W., Zhang, H., Zhang, C., Wang, Y., Zhang, X. & Wang, D. (2022). A novel horizontal gas-liquid pipe separator for wet gas based on the phase-isolation. *Chemical Engineering Research and Design*, 178, 315-327. doi: 10.1016/j.cherd.2021.12.021.
8. Hreiz, R., Lainé, R., Wu, J., Lemaitre, C., Gentric, C. & Fünfschilling, D. (2014). On the effect of the nozzle design on the performances of gas-liquid cylindrical cyclone separators. *International Journal of Multiphase Flow*, 58, 15-26. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.08.006.
9. Wen, C., Cao, X. & Yang, Y. (2011). Swirling flow of natural gas in supersonic separators. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50(7), 644-649. doi: 10.1016/j.ccep.2011.03.008.
10. Ghorbanian, K. & AminiMagham, M. (2020). Swirl intensity as a control mechanism for methane purification in supersonic gas separators. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 83, 103572. doi: 10.1016/j.jngse.2020.103572.
11. Wang, Y., Yu, Y. & Hu, D. (2020). Experimental investigation and numerical analysis of separation performance for supersonic separator with novel drainage structure and reflux channel. *Applied Thermal Engineering*, 176, 115111. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115111.
12. Rajaei Shoostari, S.H. & Shahsavand, A. (2018). Numerical investigation of water droplets trajectories during natural gas dehydration inside supersonic separator. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 54, 131-142. doi: 10.1016/j.jngse.2018.03.013.
13. Xu, Y., Yang, Z. & Zhang, J. (2017). Study on performance of wave-plate mist eliminator with porous foam layer as enhanced structure. Part I: Numerical simulation. *Chemical Engineering Science*, 171, 650-661. doi: 10.1016/j.ces.2017.05.031.
14. Kim, S.W., Kim, J., Park, S.S. & Kim, D.R. (2020). Enhanced water collection of bio-inspired functional surfaces in high-speed flow for high performance demister. *Desalination*, 479, 114314. doi: 10.1016/j.desal.2020.114314.
15. Han, C., Hu, Y., Li, W. & Bie, Q. (2022). Gas-solid separation performance and structure optimization in 3D printed guide vane cyclone separator. *Advanced Powder Technology*, 33(11), 103815. doi: 10.1016/j.apt.2022.103815.
16. Bikkulov, R.Y., Dmitrieva, O.S., Dmitriev, A.V. & Badretdinova, G.R. (2021). Cleaning Air Streams from Fine Particles in Paint Booths. *Ecology and Industry of Russia*, 25(12), 10-14. doi: 10.18412/1816-0395-2021-12-10-14.
17. Zinurov, M.E., Madyshev, I.N., Ivakhnenko, A.R. & Petrova, I.V. (2021). Development of a classifier with coaxially arranged pipes for the separation of bulk material based on silica gel. *Polzunovskiy vestnik*, 2, 205-211. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.029. (In Russ.).
18. Zinurov, V., Kharkov, V., Pankratov, E. & Dmitriev, A. (2022). Numerical Study of Vortex Flow in a Classifier with Coaxial Tubes. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 12(4), 336-346. doi: 10.46604/ijeti.2022.9568.

Information about the authors

M.O. Utkin - Postgraduate Student of the Department «Theoretical Foundations of Thermotechnics» of the Kazan State Power Engineering University.

V.V. Kharkov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Thermotechnics and Power Engineering» of the Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI.

G.R. Badretdinova - Postgraduate Student, Assistant Professor of the Department «Theoretical Foundations of Thermotechnics» of the Kazan State Power Engineering University.

A.V. Dmitriev - Doctor of Technical Sciences, Head of the Department «Theoretical Foundations of Thermotechnics» of the Kazan State Power Engineering University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 06.12.2022; одобрена после рецензирования 13.03.2023; принята к публикации 21.03.2023.

The article was received by the editorial board on 06 Dec 2022; approved after editing on 13 Mar 2023; accepted for publication on 21 Mar 2023.