

А.В. Дмитриев, д-р техн. наук, М.О. Уткин, Г.Р. Бадретдинова (Казанский государственный энергетический университет, Россия); В.В. Харьков, канд. техн. наук (Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия) E-mail: ieremiada@gmail.com

Стабилизация вихревой структуры в мультивихревом сепараторе для улавливания частиц из природного газа

Природный газ (метан), добываемый на газовых месторождениях, содержит примеси, которые могут быть твердыми (частицы горного материала), жидкими (вода, сырая нефть), газообразными (диоксид углерода, сероводород, оксиды азота и т.д.). При удалении примесей обеспечиваются повышение теплотворной способности газа, облегчение транспортировки, защита контрольно-измерительных приборов и оборудования от коррозии, износа и т.д., а также возможность использования природного газа в газовых генераторах непосредственно на месторождениях [1].

Принцип работы устройств для физического разделения аэрозолей: поток газа, содержащий дисперсные частицы, проходит через рабочую зону, где на частицы воздействуют внешние силы с отделением частиц от несущего потока. Газосепараторы классифицируются (по типу воздействия основной силы) на гравитационные, инерционные и центробежные.

Гравитационные сепараторы отличаются громоздкостью и по эффективности очистки газа уступают инерционным и центробежным устройствам. Так, в работе [2] предложен лопастной сепаратор с канавками для очистки природного газа от мелких капель (<20 мкм), в работе [3] предложена модель сепарации порошковой газозвеси в z-образном инерционном сепараторе.

Наиболее эффективными являются центробежные сепараторы, работа которых основана на разделении многокомпонентной системы при создании закрученного потока (циклоны, вихревые камеры, вихревые трубы и т.д.) [4]. Современные исследования структуры течения в этих

устройствах (ориентированные на повышение эффективности сепарации) построены на методах вычислительной гидродинамики (CFD). При моделировании [5] потока твердых частиц внутри циклонного сепаратора с использованием гибридного подхода Эйлера — Лагранжа выявлено, что газовый вихрь значительно ограничен из-за низкой тангенциальной скорости. На основе CFD-исследования [6] процесса сепарации природного газа в циклонной трубе скруббера газокomppressorной станции установлено: при наличии нескольких входов для газового потока увеличивается эффективность разделения за счет увеличения тангенциальной скорости газа.

В работе [7] предложено использование осевого циклона для улавливания парафиновых компонентов из природного газа. На основе CFD-исследований установлено: скорость газа на входе устройства более 15 м/с не оказывает значительного влияния на эффективность разделения.

Показано, что сепарационная эффективность в исследованном осевом циклоне составляет 95 %.

С развитием технологий различными исследованиями оптимизируются и совершенствуются традиционные методы сепарации природного газа, разрабатываются новые методы для очистки природного газа — например, метод дегидратации природного газа с применением ионных жидкостей [8] или сверхзвуковой метод сепарации [9, 10]. Однако эти сепарационные методы не являются универсальными, и механизмы разделения в таком оборудовании не полностью изучены. Поэтому разработка и исследование эффективных, универсальных методов и оборудо-

вания для очистки природного газа от дисперсных примесей является актуальной задачей.

Авторами данной статьи разработан мультивихревой сепаратор, предназначенный для улавливания дисперсных частиц из природного газа при непосредственной установке сепаратора на газовом коллекторе. Мультивихревой сепаратор (рис. 1) представляет собой две соосно расположенные цилиндрические трубы, одна из которых расположена внутри другой. Внешняя труба 4 является корпусом сепаратора. На цилиндрической поверхности нижней части внутренней трубы 3 по окружности равномерно выполнены отверстия 2 так, что поток газа, поступающий из газового коллектора 1, при прохождении отверстий разделяется на две части с образованием двух противоположно-направленных вихрей. В каждом соседнем отверстии поток также разделяется с образованием двух вихрей. Соседние вихри в точ-



как соприкосновения друг с другом вращаются с одинаковыми скоростями, что способствует поддержанию вращения каждого вихря.

Для стабилизации вихревой структуры в межтрубном пространстве и для повышения эффективности мультивихревого сепаратора на уровне верхней точки внутренней трубы установлен диск 5 с равномерно расположенными по окружности отверстиями между внутренней и наружной трубами (рис. 2).



Рис. 2. Трехмерная модель сепаратора с перфорированным диском (в разрезе)

Отличительное достоинство предлагаемого мультивихревого сепаратора — в зоне сепарации устройства (в межтрубном пространстве) создаются вихри малого диаметра даже при малых скоростях газа, при этом обеспечиваются значительные центробежные силы, что способствует повышению интенсивности сепарации газа и дисперсных частиц. Кроме того, сепаратор отличается простотой конструкции, эксплуатацией и технического обслуживания.

Цель данной работы — численное исследование эффективности сепарации в разработанном мультивихревом сепараторе для очистки природного газа. Произведена оценка влияния конструктивных параметров сепаратора (диаметра отверстий диска) на гидравлическое сопротивление и эффективность улавливания частиц различных размеров при изменении среднерасходной скорости газа на входе сепаратора.

Численное моделирование проведено на трехмерной модели мультивихревого сепаратора (см. 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. Число рядов отверстий — 3. Расстояние от нижней части внутренней трубы до нижней части внешней трубы — 100 мм. Общая высота исследуемого устройства — 300 мм. Высота внутренней трубы — 100 мм. В ходе исследований варьировался диаметр отверстий диска $d_0 = 6, 8, 10$ мм.

Расчеты проведены с применением модели турбулентности SST $k-\omega$ с учетом того, что в предыдущих исследованиях схожих конструкций при этом обеспечивалась хорошая сходимость с экспериментальными данными [11, 12]. Влияние шероховатости поверхности стенок не учитывалось. В качестве газовой среды принят воздух при температуре 20 °С и давлении, близком к атмосферному. В верхней части устройства задавался объемный расход газа на выходе в диапазоне 0,5...3,0 м³/ч. В нижней части устройства (на входе устройства) задавалось избыточное давление.

В результате численных исследований были выявлены два режима работы разработанного мультивихревого сепаратора. Первый режим наблюдался до значения скорости газа на входе W_{in} ориентировочно 0,031...0,039 м/с (рис. 3) и характеризовался увеличением относительной максимальной тангенциальной скорости газа в устройстве $W_{\phi max}/W_{in}$ при увеличении скорости газа на входе. Наибольшее значение $W_{\phi max}/W_{in}$ составило 2,66. Второй режим (при $W_{in} > 0,04$ м/с) характеризуется снижением параметра $W_{\phi max}/W_{in}$ в пределах от 2,60 до 2,53 при увеличении скорости газа на входе. Вероятнее всего это связано с турбулизацией течения в межтрубном пространстве сепаратора.

Гидравлическое сопротивление при уменьшении диаметров отвер-



Рис. 3. Зависимость относительной максимальной тангенциальной скорости газа в устройстве $W_{\phi max}/W_{in}$ от среднерасходной скорости газа на входе в устройство W_{in}

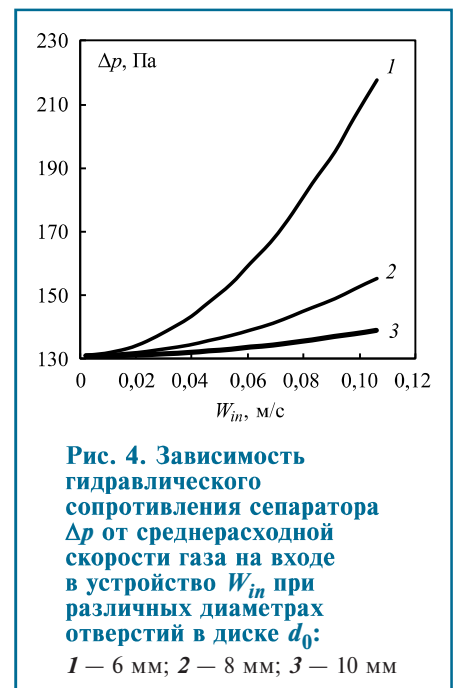
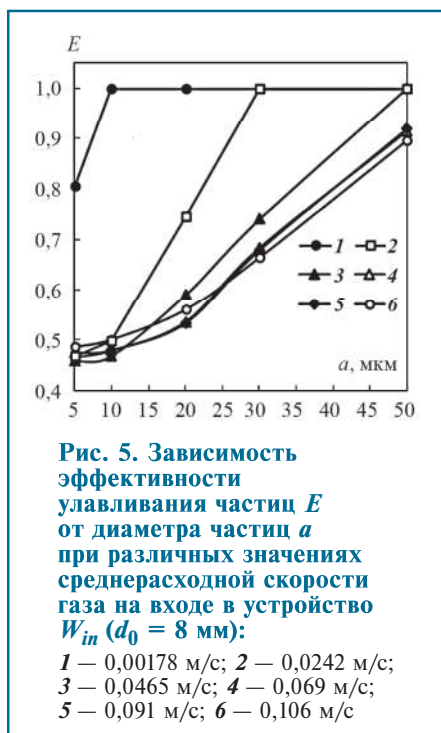


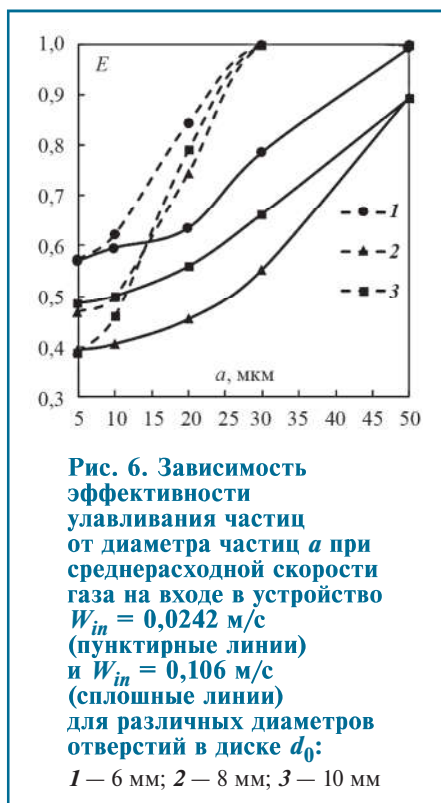
Рис. 4. Зависимость гидравлического сопротивления сепаратора Δp от среднерасходной скорости газа на входе в устройство W_{in} при различных диаметрах отверстий в диске d_0 : 1 — 6 мм; 2 — 8 мм; 3 — 10 мм

стей в диске ожидаемо увеличивается (рис. 4), что связано со снижением площади проходного сечения газа. Однако следует отметить, что значения гидравлического сопротивления устройства пренебрежимо малы ввиду малых скоростей движения газа.

В целом зависимость сепарационной эффективности устройства для дисперсных частиц в диапазоне средних размеров 5...50 мкм подобна данным для классических аппаратов, например циклонов, но есть и особенности, связанные с разделением потока внутри проточной



части устройства. Например, увеличение эффективности для частиц диаметром 5...20 мкм в диапазоне скоростей газа 0,0465...0,106 м/с — незначительное (рис. 5), вероятно, в связи с увеличением осевой со-



ставляющей скорости в межтрубном пространстве и снижением времени пребывания частиц в сепарационной зоне. Этим же фактором можно объяснить снижение эффективности при увеличении скорости газа на входе сепаратора.

Таким образом, разработанная конструкция мультивихревого сепаратора наиболее подходит для улавливания частиц из потоков, движущихся с небольшой скоростью. При скорости газа более 0,0465 м/с эффективность улавливания даже достаточно крупных частиц составляет менее 0,9. При этом увеличение скорости газа слабо влияет на эффективность в исследованном диапазоне размеров частиц.

Из рис. 6 следует, что диаметр отверстий на диске существенно влияет на эффективность работы устройства. В частности, при уменьшении диаметра отверстий в диске до 6 мм обеспечивается увеличение эффективности улавливания частиц размером менее 20 мкм примерно на 50 %.

Выводы

1. По результатам численных исследований разработанного мультивихревого сепаратора для очистки природного газа выявлены два режима работы устройства и определено значение скорости потока, при котором происходит смена режимов в исследуемом диапазоне параметров.

2. Получена зависимость гидравлического сопротивления сепаратора от среднерасходной скорости газа на входе в сепаратор.

3. По результатам расчетной оценки работоспособности устройства (при течении природного газа со скоростью на входе до 0,21 м/с и при давлении 6 МПа) эффективность улавливания капель диаметром 5...50 мкм на одной ступени мультивихревого сепаратора составила более 40 %.

4. Рассчитаны значения эффективности сепарации частиц в мультивихревом сепараторе в исследуемом диапазоне параметров. Установлено, что с увеличением скорости газа на входе в устройство эффективность сепарации снижается, поэтому разработанный сепара-

тор наиболее эффективен для улавливания частиц из потоков, движущихся с небольшой скоростью.

Список литературы

1. Santos K.M.C., Menezes T.R., Oliveira M.R. et al. Natural gas dehydration by adsorption using MOFs and silicas: A review // Sep. Purif. Technol. 2021. V. 276. P. 119409.
2. 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. V. 180. P. 306—317.
3. Tukmakov A.L., Khar'kov V.V., Akhunov A.A. Pneumatic Separation of Fractions of a Polydisperse Gas Suspension in a Low-Velocity Flow // J. Eng. Phys. Thermophys. 2022. Vol. 95. № 4. P. 902—908.
4. Николаев А.Н., Харьков В.В. Интегральные характеристики закрученных течений в газоочистном оборудовании вихревого типа // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 18. С. 130—132.
5. Kozolub P., Klimanek A., Biatecki R.A. et al. Numerical simulation of a dense solid particle flow inside a cyclone separator using the hybrid Euler—Lagrange approach // Particuology. 2017. V. 31 P. 170—180.
6. Golestaneh S.M., Toghraie D. Separation of particles from the gas by using of cyclonic separation in the cyclotubes of scrubber installed in gas compressor station // Powder Technol. 2019. V. 343. P. 392—421.
7. 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. V. 7. P. 2615—2624.
8. Yu G., Dai C., Wu L. et al. Natural Gas Dehydration with Ionic Liquids // Energy & Fuels. 2017. V. 31. N. 2. P. 1429—1439.
9. 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. V. 54. P. 131—142.
10. Ghorbanian K., Amini Magham M. Swirl intensity as a control mechanism for methane purification in supersonic gas separators // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2020. V. 83. P. 103572.
11. Zinurov V.E., Kharkov V.V., Madyshev I.N. Numerical simulation of pressure loss in a classifier with coaxial pipes // Min. Information Anal. Bull. 2022. N. 10—1. P. 173—181.
12. Zinurov V., Kharkov V., Pankratov E. et al. Numerical Study of Vortex Flow in a Classifier with Coaxial Tubes // Int. J. Eng. Technol. Innov. 2022. V. 12. N. 4. P. 336—346.