

Факторы, определяющие условия реализации сепарационного процесса в инерционных жалюзийных сепараторах

С.И. Голубева, О.С. Власова, Л.И. Хорзова
Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы повышения надежности высокоэффективной очистки пылегазовых вентиляционных и технологических выбросов в интенсивных аппаратах мокрой газоочистки посредством исследования процесса сепарации капельной жидкости из потока очищенного газа и разработки предложений конструктивного и технологического совершенствования инерционных жалюзийных каплеуловителей, как наиболее перспективных, входящих в состав газоочистного оборудования.

Ключевые слова: интенсивные аппараты мокрой газоочистки, инерционные жалюзийные сепараторы, капельная дисперсия, критическая скорость, эффективность каплеулавливания.

В ходе осуществления комплексных процессов пылегазоулавливания наибольший эффект достигается в интенсивных аппаратах мокрой газоочистки [1-3]. Однако, эффективность их работы существенным образом зависит от величины каплеуноса рабочей жидкости из реакционной зоны установки. Поэтому задача предотвращения капельного уноса является одной из главных при совершенствовании конструкции аппаратов мокрой газоочистки пылегазовых выбросов систем вентиляции, как и задачи исследования закономерностей сепарации капельной жидкости из потока очищенного газа [4,5].

В газоочистных аппаратах с высокой пропускной способностью по очищаемому газу наиболее перспективным типом каплеуловителей, по сравнению с гравитационными и центробежными [6,7], являются инерционные жалюзийные сепараторы, которые представляют собой набор пластин конкретной длины и определенного профиля, установленных на определенной высоте и под определенным углом относительно фронтальной поверхности входа газодисперсного потока [8].

В основу происходящего в них процесса сепарации заложен эффект возникновения равных по величине центробежных импульсов капель жидкости и газового потока, который проявляется при изменении направления движения двухфазного воздушного потока. В результате, капельная дисперсия, которая обладает значительно большей плотностью, выносится за пределы основного газового потока, что приводит к ее дальнейшему торможению вследствие касания направляющих газовых поверхностей [9].

С увеличением скорости газодисперсных потоков эффективность сепарации всех конструкций инерционных жалюзийных каплеуловителей увеличивается. Но этот рост не может быть безграничным, так как в определенном интервале скоростей [9,10], из-за возникновения вторичного каплеуноса, происходит резкое снижение эффективности сепарации, наступает, так называемое, вторичное “захлебывание” сепаратора.

Величина критической скорости газожидкостного потока в свободном сечении перед сепаратором, для горизонтальных пакетов сепарационных элементов [11], вычисляется по формуле:

$$g_{кр.г} = A^{0,5} \frac{K_1 K_2}{\mu_{ж}^{0,08}} \sqrt{\rho_{ж}}, \text{ м/с} \quad (1)$$

где A – опытный коэффициент, принимаемый равным 0,3-0,4; K_1 – величина, определяемая количеством жидкости в газовом потоке и физическими свойствами газо-жидкостной системы; K_2 - величина, которая характеризует конструктивные особенности сепарирующих элементов; $\rho_{г}$ и $\rho_{ж}$ - плотности газа и жидкости, соответственно, кг/м³.

Режим захлебывания сепаратора может наступить и при меньших нагрузках по жидкости и газу в тех случаях, когда свободное сечение жалюзийной решетки $F_{реи}$ меньше свободного сечения рабочего объема

корпуса сепаратора F_k . Поэтому при конструировании сепарационных устройств всегда должно быть соблюдено соотношение $\frac{F_k}{F_{peu}} \geq 1$ [11].

Так как повышение скорости газожидкостного потока в горизонтальных сепараторах лимитируется прекращением канального отвода жидкости, дальнейшая интенсификация режимов работы сепараторов возможна только при соответствующей организации ее отвода с поверхности сепарирующих элементов. Этот принцип нашел применение в конструкциях вертикальных и наклонных жалюзийных сепараторов [11] и позволил увеличить допустимые скорости газа более чем в два раза.

Величина критической скорости газожидкостного потока для вертикальной и наклонной установки пакетов сепарирующих элементов жалюзийных каплеуловителей, определяется уравнением

$$g_{кp.г.} = (0,35 \div 0,45) \left(\frac{K_{const} - 1,69 \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,56} \left(\frac{h \cdot t}{b} \right)^{0,25} \frac{1}{\cos \alpha}}{0,40} \right), \text{ м/с} \quad (2)$$

где K_{const} – параметр, характеризующий максимальную нагрузку по газу, для конкретных профилей он может быть принят равным $21 \div 22$; $(1-x)$ – начальная влажность, %, h – расстояние между смежными сепарирующими элементами; b – ширина струи потока после изменения направления его движения (поворота), м.

Данная зависимость справедлива при начальном содержании влаги от 0 до 60 вес. % [11].

Анализ рассмотренных конструкций жалюзийных каплеуловителей позволяет заключить, что максимальная скорость газового потока в свободном сечении сепаратора определяется его конструктивным исполнением, высотой установки пакета элементов сепарации в реакционном объеме газоочистного оборудования, расстоянием по высоте между

смежными сепарирующими элементами, их геометрическими размерами, направлением входа очищаемого газа в аппарат, и, конечно же, физико-химическими свойствами контактирующих сред и величиной каплеуноса из активного объема газоочистного аппарата [12].

Эффективность каплеулавливания в жалюзийных сепараторах, при установленной скорости, прямо пропорциональна величине угла поворота потока α и определяется по формуле

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{0,0174d_k^2 \rho_{ж} g \sum \alpha}{18\mu_r b}\right), \quad (3)$$

где $\sum \alpha$ – сумма углов поворотов потока в межжалюзийном канале, град;

b – ширина струи потока после поворота, м; d – диаметр единичной капли жидкости, м; μ_r – коэффициент динамической вязкости газа, кг/м.

Но, одновременно, с увеличением угла поворота газожидкостного потока, возрастает и гидравлическое сопротивление системы вследствие повышения турбулентных пульсаций потока [13].

Гидравлическое сопротивление инерционных жалюзийных каплеуловителей ΔP_c , Па, рассчитывается по формуле:

$$\Delta P_c = \xi_c \cdot g_r^2 \rho_r / 2, \quad (4)$$

где g_r – скорость газового потока, м/с, ξ_c – коэффициент местного сопротивления сепарирующего устройства, который может быть определен по следующим формулам:

- для вертикальных и горизонтальных пакетов сепарирующих элементов

$$\xi_c = (2,4n - 2) \operatorname{ctg}^2 \alpha; \quad (5)$$

- для наклонных пакетов сепарирующих элементов

$$\xi_c = (1,8n - 0,9) \operatorname{ctg}^2 \alpha; \quad (6)$$

где n – число ступеней сепарации.

Конструктивное исполнение существующих инерционных жалюзийных сепараторов для снижения потерь напора газового потока, возникающих при изменении направления его движения (повороте на определенный угол, обеспечивающий эффективное отделение капель жидкости), предусматривает разделение начального угла поворота на равные углы меньшей величины (до 30°) с последовательным их расположением и периодическим чередованием направления их сторон. Сумма таких углов, вызывая многократное, но относительно незначительное изменение направления движения, обеспечивает равновеликий эффект отделения капель жидкости при меньшем пульсационном возмущении потока [13].

К недостаткам рассмотренной схемы сепарации можно отнести существенное увеличение пути поступательного движения потока для получения эффективной сепарации капель и необходимость снижения скорости движения газожидкостного потока из-за значительного возрастания вторичного каплеуноса с поверхности пленки жидкости, которая образуется на направляющих жалюзи сепаратора. К тому же, следует отметить и значительную металлоемкость устройства, и сложность эксплуатации – замены отдельных пластин, их очистки и т.д.

При рассмотрении процесса улавливания капель необходимо учитывать также влияние турбулентного перемешивания на всем пути движения газа. Это позволяет предположить, что концентрация капель постоянна в любом поперечном сечении аппарата.

Для повышения эффективности сепарации капельной дисперсии из двухфазного очищенного газового потока предлагается устройство радиально-инерционного сепаратора, включающего следующие последовательно выполняемые операции:

- коаксиальный ввод газожидкостного потока в зону сепарации;

- разделение двухфазного потока на некоторое число составляющих потоков для снижения возникающего импульса;
- поворот организованных потоков на угол не менее 90° и формирование радиально направленных веерных течений (первый этап сепарации);
- повторный поворот двухфазных потоков на угол 90° (второй этап сепарации);
- соединение отсепарированных газовых потоков при условии сохранения постоянства количества движения (импульса $\mathcal{G}_r \approx const$);
- коаксиальный вывод отсепарированного потока газа из зоны сепарации.

На первом этапе сепарации при повороте газожидкостного потока на угол не менее 90° возникают центробежные силы, величина которых прямо пропорциональна массе капель жидкости:

$$F_u = \frac{m_k \mathcal{G}_k^2}{R} \quad (7)$$

где m_k – масса капель жидкости, \mathcal{G}_k – скорость капель жидкости м/с; R – радиус кривизны траектории движения капли жидкости, м.

Капли жидкости, плотность которых в 10^3 превышает плотность газа, под влиянием сил инерции, фактически не меняют первоначальное направление движения [13]. В результате происходит их смещение в пограничный слой газового потока и торможение при столкновении с направляющими поверхностями сепарирующего элемента.

В результате слияния единичных капель на поверхности сепарирующих элементов образуется пленка жидкости, которая дрейфует в направлении движения газового потока – по радиусу к наружной кромке направляющих сепарирующего элемента. Одновременно с этим, за счет поступления более мелких капель, происходит процесс увеличения толщины

пленки в направлении ее движения и, соответственно, накопления массы жидкости в объеме пленки, который прилегает к краю направляющих сепарирующего элемента.

Когда действие силы тяжести начинает превышать силы поверхностного натяжения, при достижении критической толщины пленки, наблюдается явление вторичного уноса, проявляющееся в локальном отрыве отдельных капель жидкости. Размер вторично образованных капель существенно превышает величину первоначально вносимых и характеризуется постоянным осредненным диаметром от 400 до 800 мкм.

На движение капель, которое формируется в процессе вторичного уноса, оказывают одновременное воздействие силы тяжести и динамического давления веерообразно развивающегося воздушного потока. Крупные размеры капель делают соизмеримым эффект проявления этих сил, что можно подтвердить расчетным путем на основе известных зависимостей [14].

В итоге, траектория движения капель искривляется под влиянием силы тяжести. Вследствие чего, капли жидкости при втором повороте (второй этап сепарации) воздушного потока, когда аэродинамическое давление становится противодействующей силе тяжести, сохраняют радиально направленное движение. Импульс, который сообщается каплям при отрыве от пленки, является вполне достаточным для их переноса к внутренней поверхности корпуса сепаратора, где при ударе происходит аналогичный ранее рассмотренному процесс образования жидкостной пленки, которая под воздействием силы тяжести стекает вниз.

Так как поступления капельной жидкости неравномерно по поверхности корпуса, происходит локальное утолщение пленки. В результате чего возникают жидкостные струи, которые способствуют более активному выводу жидкости из сепарационной зоны в поддон сепаратора.

Отсепарированный поток воздуха выводится из зоны сепарации вверх коаксиально оси устройства через конфузорный патрубок.

При движении газового потока по каналам сепарирующих устройств сложной формы неизбежно появление вихревых зон, которые являются источником дополнительного осаждения капель жидкости на поверхности сепарирующих элементов. Для достижения высокой эффективности сепарации капельной влаги из газожидкостного потока, при совершенствовании конструкций инерционных жалюзийных каплеуловителей радиально-инерционного действия в аппаратах с интенсивным режимом газоочистки, следует обратить внимание на исполнение профиля пакетов сепарирующих элементов, активно формирующих радиально направленные веерные течения газового потока, определив при этом, эффективные соотношения их конструктивных и технологических параметров.

Литература

1. Arravsmith A., Ashton N., Parsons A.C. Gaseous emission control by gas absorption some case studies // Process Safety and Environ. Prot. 1990. V.68, №3. pp. 176–180.
2. Азаров В.Н., Кошкарев С.А. К экспериментальной оценке эффективности аппарата мокрой очистки в системах обеспыливания выбросов в атмосферу от печей обжига керамзита // Инженерный вестник Дона, 2014, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2572.
3. Сергина Н.М. О применении вероятностного подхода для оценки эффективности многоступенчатых систем пылеулавливания // Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/%20n3y2013%20/1866/.



4. Волгин С.И., Исаев В.Н. Опыт эксплуатации каплеуловителей за системами мокрой газоочистки // Промышленная и санитарная очистка газов. 1983. №1. С.11-12.
 5. Житло А.Г., Хазан И.М. Исследование эффективности инерционно-центробежных сепараторов. // Химическое и нефтяное машиностроение. 1979. №4. С. 10-12.
 6. Сафонов В.Н., Приходько В.П. Сравнительные испытания центробежных каплеуловителей. // Промышленная и санитарная очистка газов. 1982. №3. С. 17-20.
 7. Систер В.Г., Вевировский М.М., Чернышев В.И. Исследование гидродинамики центробежного сепаратора для разделения газожидкостного потока // Химическое и нефтяное машиностроение. 1970. №2. С. 20-24.
 8. Лебедюк Г.К. Исследование гидродинамики жалюзийных каплеуловителей. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1979. 253 с.
 9. Пирунов А.И. Аэродинамические основы инерционной сепарации // М., Госстройиздат, 1961. 123 с.
 10. Hinze J.O. Critical velocities and sizes of liquid globules. J. Appl. Phys. №1.1949. pp. 273–288.
 11. Кигур Ю.Н. Некоторые данные экспериментальных исследований жалюзийных сепараторов. Рига: РПИ сб. №5, 1972. 43 с.
 12. Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике: Пособие к расчету аппаратов. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2008. 729 с.
 13. Беннет К.О., Майерс Дж.Е. Гидродинамика, теплообмен и массообмен. Пер. с англ. М.: Изд-во «Недра», 1966. 726 с.
 14. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем // М.: Энергия, 1976. 296 с.
-

References

1. Arravsmith A., Ashton N., Parsons A.C. Process Safety and Environmental Protection. 1990. V.68, №3. pp. 176-180.
2. Azarov V.N., Koshkarev S.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2572/.
3. Sergina N.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/%20n3y2013%20/1866.
4. Volgin S.I., Isaev V.N. Promyshlennaya i sanitarnaya ochildka gazov. 1983. №1. pp. 11-12.
5. Zhitlo A.G., Khazan I.M. Khimicheskoye i neftyanoye mashinostroyeniye. 1979. №4. pp. 10-12.
6. Safonov V.N., Prihod'ko V.P. Promyshlennaya i sanitarnaya ochildka gazov. 1982. №3. pp. 17-20.
7. Sister V.G., Vevirovskii M.M, Chernyshev V.I. Khimicheskoye i neftyanoye mashinostroyeniye. 1970. №2. pp. 20-24.
8. Lebedyuk G.K. Issledovaniye gidrodinamiki zhalyuziinykh kapleulovitelei. Fiziko-himicheskaya gidrodinamika [Investigation of the hydrodynamics of louver mist eliminators. Physicochemical hydrodynamics]. Moscow: Fizmatgiz, 1979. 253 p.
9. Pirunov A.I. Ayerodinamicheskie osnovy inertsionnoi separatsii [Aerodynamic fundamentals of inertial separation]. Moscow: Gosstroizdat, 1961. 123 p.
10. Hinze J.O. Journal of Applied Physics. 1949. №1. pp. 273-288.
11. Kigur Yu.N. Nekotorye dannye eksperimental'nykh issledovaniy zhalyuziinykh separatorov [Some data on the experimental investigations of louver separators]. Riga: RPI sb. №5, 1972. 43 p.



12. Laptev A.G., Farakhov M.I. Gidromekhanicheskiye protsessy v neftehimii i energetike: Posobie k raschetu apparatov [Hydromechanical processes in petrochemistry and energy engineering: Guidebook to design analysis of apparatuses]. Kazan: Izd-vo Kazanskogo un-ta, 2008. 729 p.

13. Bennet C.O., Myers J.E. Gidrodinamika, teploobmen i massoobmen. Per. s angl. [Momentum, heat and mass transfer]. Moscow: Izd-vo «Nedra», 1966. 726 p.

14. Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. Gidrodinamika gazozhidkostnyh system [Hydrodynamics of liquid-gas systems]. Moscow: Energiya, 1976. 296 p.