



Исследования эффективности сепарации капельной дисперсии в радиально-инерционном жалюзийном сепараторе в зависимости от его конструктивных характеристик и гидравлических параметров режима сепарации

С.И. Голубева, О.С. Власова, Л.И. Хорзова, Д.В. Текущин

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы исследования эффективности сепарации капельной влаги рабочей жидкости из вертикально-восходящего газожидкостного потока в интенсивных аппаратах мокрой пылегазоочистки в зависимости от относительного газосодержания, скорости газожидкостного потока и конструктивных характеристик радиально-инерционного жалюзийного сепаратора, входящего в состав газоочистного оборудования. В рамках исследованного диапазона гидравлических параметров режима сепарации установлены оптимальные соотношения между ключевыми конструктивными параметрами предлагаемого сепарационного устройства для реализации эффективного процесса каплеулавливания.

Ключевые слова: интенсивные аппараты мокрой пылегазоочистки, радиально-инерционный жалюзийный сепаратор, газожидкостный поток, эффективность каплеулавливания

Специфика технологических циклов ряда современных производств обусловлена последовательной реализацией процессов, сопровождающихся образованием значительных объемов экологически опасных газопылевых выбросов [1]. Локализация и отвод этих выбросов от источников их генерации обеспечивается системами местной и общеобменной вытяжной вентиляции, поддерживающих нормативные показатели концентраций аэрозолей и газов в воздухе рабочей зоны помещений.

Для очистки локализованных выбросов, зачастую представляющих собой неоднородные многокомпонентные смеси, эти установки оснащаются оборудованием пылегазоулавливания [2]. Наиболее высокая эффективность достигается при использовании мокрых методов очистки в аппаратах с интенсивным режимом работы [3,4], что позволяет одновременно удалять как твёрдые, так и газообразные составляющие. Однако одним из существенных недостатков таких аппаратов является унос капельной дисперсии рабочей жидкости вместе с очищенным газовым потоком, что

снижает общую эффективность пылегазоочистки. В связи с этим ключевыми задачами при проектировании и модернизации мокрых пылегазоочистных установок становится минимизация каплеуноса из реакционной зоны и изучение закономерностей отделения капель жидкости из очищенного газового потока [5-7].

В интенсивных аппаратах мокрой пылегазоочистки для улавливания капельной влаги наиболее часто применяются инерционные жалюзийные сепараторы [8-10]. Однако, при использовании их как в пенных, так и вихревенных пылегазоуловителях, эффективность улавливания капельной жидкости заметно снижается за счет уноса воздушном потоком мелкодисперсной фракции рабочей жидкости [11, 12].

Предлагаемое к исследованию устройство инерционного жалюзийного сепаратора отличается двухэтапной схемой инерционного отделения капельной жидкости из вертикально-восходящего газожидкостного потока в аппаратах мокрой пылегазоочистки, предназначенных для очистки как технологических, так и вентиляционных выбросов. Конструктивно сепаратор выполнен в виде пакета профилированных пластин, установленных с фиксированным шагом и определённым углом к направлению вертикально входящего газожидкостного потока.

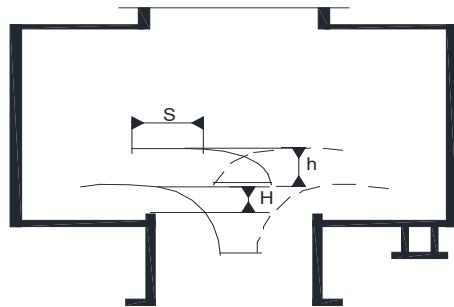


Рис. 1. Каплеуловитель с сепарирующими элементами, выполненными в форме специально профилированных пластин

Эффективность сепарации напрямую зависит от ряда параметров: газосодержания очищаемого потока (g , $\text{м}^3/\text{м}^3$), его скорости в активном сечении каплеуловителя (V , $\text{м}/\text{с}$), а также геометрических характеристик самого сепаратора - в частности, формы и размеров сепарирующих элементов (S), формирующих радиально направленные веерные течения газожидкостного потока, высоты размещения нижнего пакета пластин над входным патрубком (H) и расстояния между соседними пакетами сепарирующих направляющих пластин (h).

Исследования проводились на экспериментальной установке, оснащенной сепарирующими элементами, выполненными в виде специально спрофилированных лопаток. Конструкция установки позволяла варьировать расходные характеристики, визуализировать процессы и проводить инструментальные измерения.

Устройство сепаратора включает вертикальный цилиндрический корпус с коаксиально расположенным входным патрубком, заглублённым снизу. В верхней части патрубка установлена жалюзийная круговая решётка, лопасти которой имеют профиль равнобочкой гиперболы. Соседние жалюзи частично перекрывают друг друга в плане, формируя криволинейные конфузорные каналы. В верхней части корпуса расположен выпускной патрубок, а в нижней - сливной штуцер для отвода уловленной жидкости.

Принцип работы сепаратора основан на радиальном повороте вертикально восходящего газожидкостного потока, который при движении вверх по патрубку разделяется нижними кромками лопаток на отдельные струи, которые, отклоняясь от вертикали по гиперболическому профилю лопаток, ускоряются в межлопаточных каналах без значительного роста турбулентности или поперечных пульсаций.

При изменении направления движения газодисперсного потока более крупные капли оседают на поверхности лопаток и под воздействием

воздушного потока перемещаются к их внешним краям. Мелкие капли, получая дополнительное ускорение в межлопаточных каналах, после выхода из них, продолжают движение по инерции и при вторичном повороте потока вверх к выпускному патрубку, сталкиваются с внутренней стенкой корпуса, теряют скорость и, формируя жидкостную плёнку, стекают в нижнюю часть сепаратора, откуда удаляются через сливной штуцер. Очищенный воздушный поток выводится через верхний патрубок.

В ходе исследований были установлены оптимальные соотношения между диаметром входного сечения сепаратора (d) и его ключевыми конструктивными параметрами (H , S , h). Исследования проводились при двух фиксированных значениях высоты расположения нижнего пакета лопаток, а именно, $H = 0,666d$ и $H = 0,333d$ и фиксированном расстоянии между пакетами пластин $h = 0,333d$. При этом варьировались ширина сепарирующего элемента ($S = 0,333d$, $0,222d$, $0,111d$), скорость газожидкостного потока (от 7,5 до 20 м/с) и относительное газосодержание ($g = 2 \cdot 10^3$, $3 \cdot 10^3$, $5 \cdot 10^3$ и $10 \cdot 10^3$ м³/м³), определяемое по формуле (1)

$$g = \frac{L}{G_{ж}}, \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (1)$$

где L – объемный расход воздуха, проходящего через каплеуловитель, (м³/ч), $G_{ж}$ – количество жидкости, поступающей в сепаратор вместе с воздушным потоком.

Эффективность каплеотделения рабочей жидкости оценивалась по величине каплеуноса G_y (г/м³), отнесённого к единице объёма проходящего через сепаратор воздуха и к единице объёма распыляемой в инжекторе воды. Результаты аэродинамических испытаний показали, что при постоянном газосодержании ($g = \text{const}$) уменьшение ширины сепарирующего элемента (S) приводит к снижению эффективности каплеотделения и росту величины

каплеуноса как при высоте расположения нижнего пакета сепарирующих элементов $H = 0,333d$, так и при $H = 0,666d$.

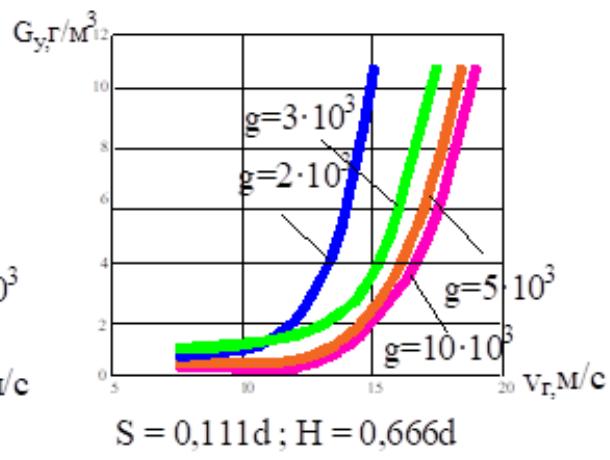
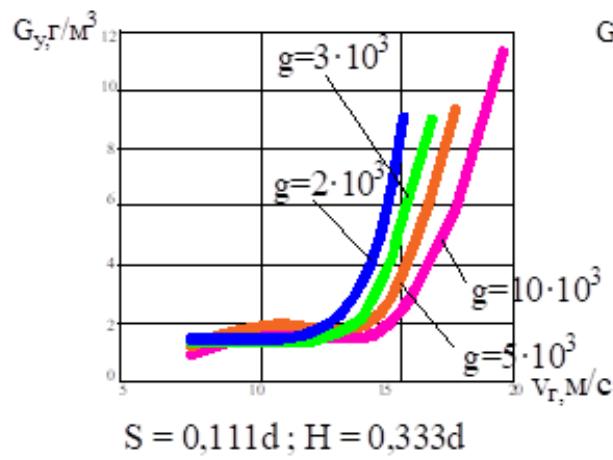
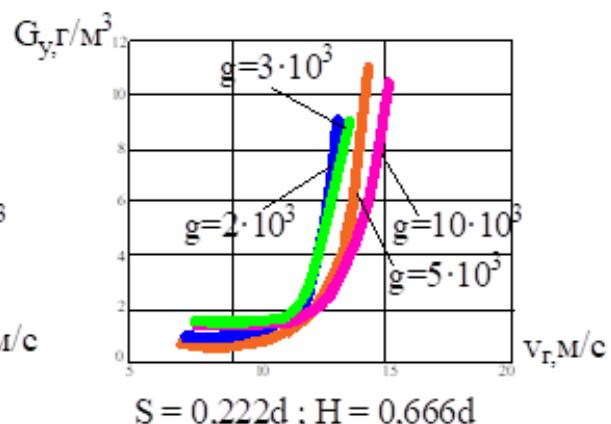
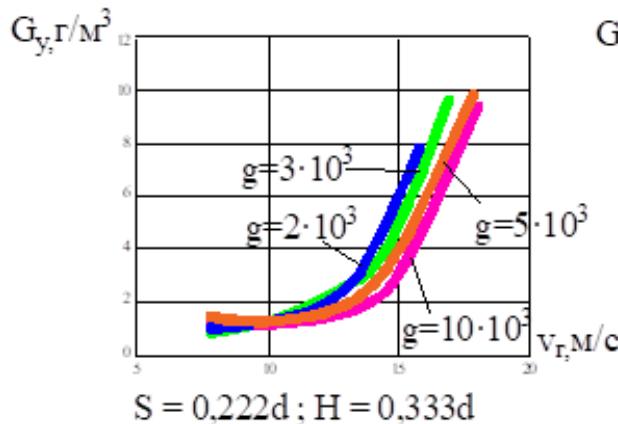
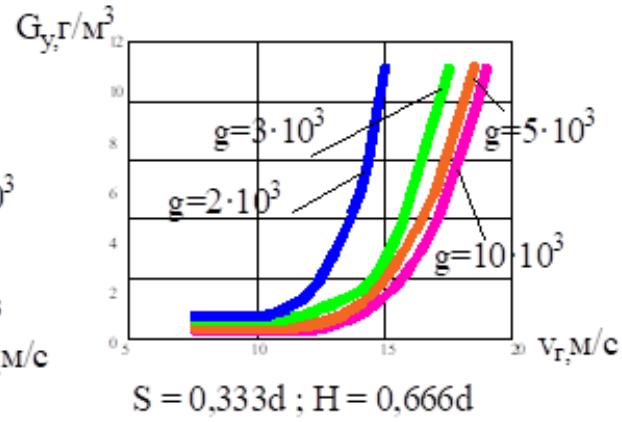
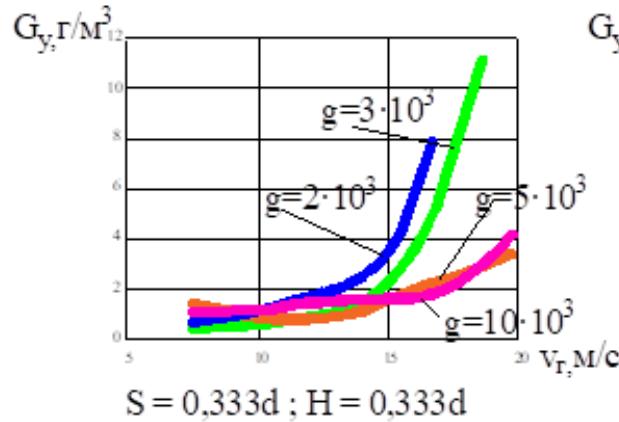


Рис. 2. Зависимость величины каплеуноса (G_y) от скорости газожидкостного потока (V_r), при его различном относительном газосодержании для разных конструктивных параметров сепарирующего устройства.



Аналогично, снижение высоты размещения нижнего пакета радиально направленных лопаток (Н) ухудшает сепарационные характеристики, особенно при высоких значениях относительного газосодержания. При этом степень влияния высоты установки на эффективность сепарации возрастает с увеличением относительного газосодержания потока.

Значимое влияние газосодержания на каплеунос проявляется при скоростях газожидкостного потока выше 12,5 м/с, при которых для всех предлагаемых конструктивных вариантов исполнения сепарирующего устройства наблюдается резкий рост аэрозольного уноса капель жидкости. При этом зависимость между значением относительного газосодержания и интенсивностью увеличения каплеуноса G_y , обратно пропорциональна. При скорости газодисперсного потока, в пределах от 12,5 до 15 м/с, при уменьшении относительного газосодержания от $10 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^3$ м³/м³, величина каплеуноса в среднем возрастает на 200%.

В то же время при скоростях до 12,5 м/с, при различных значениях относительного газосодержания, эффективность сепарации практически не зависит от конструктивных параметров сепаратора, а для конфигурации с шириной сепарирующего элемента $S = 0,333d$, $H = 0,333d$ и $h = 0,333d$ стабильная эффективность каплеулавливания сохраняется даже при скорости до 15 м/с.

Обобщая результаты, можно констатировать, что разработанный радиально-инерционный жалюзийный каплеуловитель демонстрирует высокую эффективность: его КПД превышает показатели известных аналогов. Наибольшее значение коэффициента сепарации ($\eta > 99\%$) достигается при ширине лопатки $S = 0,333d$ и газосодержании до $g = 5 \cdot 10^3$ м³/м³. При увеличении относительного газосодержания до $10 \cdot 10^3$ м³/м³ эффективность сепарации остаётся на уровне не ниже 98%.

Для оценки аэродинамического совершенства различных вариантов конструктивного исполнения сепаратора использовался коэффициент гидравлического сопротивления (ζ), который характеризует энергетическую эффективность процесса, определяемый по формуле:

$$\xi_{\text{вх}} = \frac{\Delta P}{\frac{\gamma \cdot V_r^2}{2}} \quad (2)$$

где γ — объёмная плотность воздушного потока ($\text{кг}/\text{м}^3$), V_r — скорость газожидкостного потока во входном сечении сепаратора ($\text{м}/\text{с}$), ΔP — потеря полного давления в сепараторе (Па), рассчитываемая как разность давлений до ($P_{\text{пн}}$) и после ($P_{\text{пк}}$) устройства:

$$\Delta P = P_{\text{пн}} - P_{\text{пк}}, \quad (3)$$

Минимальное значение КПД разработанного радиально-инерционного жалюзийного каплеуловителя превышает аналогичные показатели известных конструкций [12].

Таким образом, в рамках исследованного диапазона параметров, оптимальной по совокупности является конфигурация радиально-инерционного жалюзийного сепаратора со следующими конструктивными характеристиками: высотой расположения нижнего пакета сепарирующих элементов равной $H=0,333d$, шириной радиально направленной части лопатки сепарирующего элемента $S=0,333d$ и расстоянием между смежными пакетами сепарирующих элементов $h=0,333d$.

Литература

1. Azarov V.N., Sergina N.M., Kondratenko T.O. Problems of protection of urban ambient air pollution from industrial dust emissions, MATEC Web of Conferences. 106 (2017) 07017. pp. 894-899

-
2. Stefanenko I.V., Azarov V.N., Sergina N.M. Dust Collecting System for the Cleaning of Atmospheric Ventilation Emissions, Trans Tech Publications, Switzerland. 878 (2017). pp. 269-272.
3. 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.
4. Мухленов И.П., Туболкин А.Ф., Тумаркина Е.С., Тарат Э.Я. Режим и пенные аппараты // Л.: Химия. 1977. 324 с.
5. Волгин С.И., Исаев В.Н. Опыт эксплуатации каплеуловителей за системами мокрой газоочистки // Промышленная и санитарная очистка газов. 1983. №1. С.11-12.
6. Николаев А.Н., Малюсов В.А. Опыт эксплуатации каплеуловителей за системами мокрой газоочистки металлургических агрегатов // Промышленная и санитарная очистка газов. 1980. №1. С.235-242.
7. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем // М.: Энергия. 1976. 296 с.
8. Еникеев И.Х. Математическое моделирование процесса разделения газокапельных потоков в сепараторах жалюзийного типа. // Теоретические основы химической технологии , 1995, №5 с.488 - 495.
9. Лебедюк Г.К. Исследование гидродинамики жалюзийных каплеуловителей. Физико-химическая гидродинамика //Физматгиз.1979.253с.
10. Кигур Ю.Н. Некоторые данные экспериментальных исследований жалюзийных сепараторов // Рига.: РПИ. 1992. 43 с.
11. Голубева С.И, Хорзова Л.И. Обобщение режимных условий работы каплеуловителей интенсивных аппаратов мокрой газоочистки // Инженерный вестник Дона, 2021, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6883



12. Голубева С.И., Власова О.С., Хорзова Л.И. Факторы, определяющие условия реализации сепарационного процесса в инерционных жалюзийных сепараторах // Инженерный вестник Дона, 2021, №5 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6990

References

1. Azarov V.N., Sergina N.M., Kondratenko T.O.. MATEC Web of Conferences. 106 (2017) 07017. pp. 894-899.
2. Stefanenko I.V., Azarov V.N, Sergina N.M. Trans Tech Publications, Switzerland. 878 (2017). pp. 269-272.
3. Azarov V.N., Koshkarev S.A., Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/ N4y2014/2572.
4. Muhlenov I.P., Tubolkin A.F., Tumarkina E.S., Tarat E.Ya. Rezhim i pennye apparaty [Mode and foam apparatuses]. L.: Himiya, 1977. 324 p.
5. Volgin S.I., Isaev V.N. Promyshlennaya i sanitarnaya ochistka gazov. 1983. №1. pp.11-12.
6. Nikolaev A.N., Malyusov V.A. Promyshlennaya i sanitarnaya ochistka gazov. 1980. №1. pp.235-242.
7. Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. Gidrodinamika gazozhidkostnyh sistem [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. M.: Yenergija, 1976. 296 p.
8. Enikeev I.H. Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii. 1995. №5. pp.488 - 495.
9. Lebedyuk G.K. Issledovanie gidrodinamiki zhalyuziinyh kappleulovitelei. Fiziko-himicheskaja gidrodinamika [Research of the hydrodynamics of louvered drop eliminators. Physical and chemical hydrodynamics]. Fizmatgiz, 1979. 253 p.
10. Kigur YU.N. Nekotorye dannye eksperimental'nyh issledovanii zhalyuziinyh separatorov [Some data from experimental studies of louver separators]. Riga. RPI sb. №5, 1992. 43 p.



11. Golubeva S.I., Horzova L.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №3.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6883
12. Golubeva S.I., Vlasova O.S., Horzova L.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6990

Дата поступления: 11.12.2025

Дата публикации: 7.02.2026