

РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ЧАСТИЦ, УЛАВЛИВАЕМЫХ В ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ-КЛАССИФИКАТОРА

М. А. Юровская^{1✉}, В. К. Леонтьев¹, А. Е. Лебедев²

*Кафедры: «Химическая технология органических веществ» (1),
barashevama@yustu.ru; «Технологические машины и оборудование» (2),
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
Ярославль, Россия*

Ключевые слова: время осаждения; минимальный размер улавливаемых частиц; пылеуловитель-классификатор; скорость осаждения; центробежная сепарация.

Аннотация: Представлено описание принципа работы нового высокоэффективного пылеуловителя-классификатора, включающего три ступени очистки пылегазового потока. Предложена методика расчета минимального размера частиц, улавливаемых на первой ступени данного аппарата, основанная на закономерностях осаждения частиц при ламинарном режиме. Выполнен расчет минимального размера улавливаемых частиц – отходов литейного производства. Получена зависимость минимального размера улавливаемых частиц от расхода газового потока, а также распределение минимального размера улавливаемых частиц по сечению первой ступени.

Введение

Во многих отраслях промышленности при проведении технологических операций происходит попадание мелкодисперсной пыли в отходящие газовые потоки. Остаточное количество этих частиц зачастую попадает в атмосферу и пагубно влияет на флору и фауну, а также необратимо воздействует на здоровье человека [1 – 3]. Поэтому внедрение новых и интенсификация существующих технологических процессов и аппаратов очистки промышленных выбросов является очень важной задачей. В настоящее время в качестве пылеулавливающего оборудования наиболее широкое применение находят аппараты инерционного типа. Они просты в эксплуатации и изготовлении, позволяют очищать пылегазовые потоки с большой начальной запыленностью и выделять пыль в сухом виде [1]. Кроме этого, в ряде отраслей промышленности необходимо не только выделить пыль из газового потока, но и классифицировать ее по фракциям, так как частицы определенного размера являются целевым продуктом. Задача классификации может быть решена как в отдельном аппарате – классификаторе, так и в аппаратах, совмещающих функции пылеуловителей и классификаторов [1, 4].

В Ярославском государственном техническом университете разработана одна из моделей такого пылеуловителя-классификатора.

Цель работы – рассчитать минимальный диаметр частиц, улавливаемых на первой ступени очистки пылеуловителя-классификатора. Установить зависимость минимального размера частиц от объемного расхода газовой фазы в аппарате.

Методика и результаты расчета минимального размера улавливаемых частиц

Разработанный пылеуловитель-классификатор позволяет осуществить высокоэффективную очистку пылегазового потока и одновременно классифицировать уловленную пыль по фракциям. Кроме этого, данная модель имеет ряд конструктивных и технологических преимуществ перед аналогичными конструкциями [5, 6].

Схема аппарата представлена на рис. 1. В корпусе аппарата 1 размещены три ступени выделения твердых частиц из газового потока. Газ, содержащий взвешенные частицы, через спиральный входной патрубок 2 поступает на *первую* ступень очистки I, где крупные частицы пыли за счет центробежной силы смещаются к периферии и по наклонному днищу 4 опускаются к патрубку 3, а затем удаляются из аппарата. Поток газа со средней и мелкой фракцией поступает на *вторую* ступень очистки II, расположенную в пространстве между приемным цилиндром 6 и экраном 7. На второй ступени очистки за счет изменения направления движения потока происходит отделение частиц средней фракции, которые выводятся через патрубок 5. Поток газа с мелкой фракцией огибает наружную поверхность приемного цилиндра 8 и поступает на *третью* ступень очистки III, на которой за счет неподвижных лопастей 9 происходит закрутка пылегазового потока, повышается действие центробежной силы, в результате чего мелкодисперсные частицы отделяются от газового потока через выходной патрубок 10, а мелкодисперсные частицы пыли по спиралеобразной траектории вдоль стенок приемного цилиндра 8 опускаются на наклонное днище 11 и выводятся из аппарата через патрубок 12.

Расчет минимального размера частиц, улавливаемых в первой ступени пылеуловителя-классификатора, проводился для частиц – отходов литейного производства с плотностью $\rho_{ч} = 3170 \text{ кг/м}^3$, которые равномерно распределены в воздушном потоке плотностью $\rho = 1,206 \text{ кг/м}^3$ и динамической вязкостью $\mu = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Канал первой ступени пылеуловителя-классификатора имеет следующие размеры:

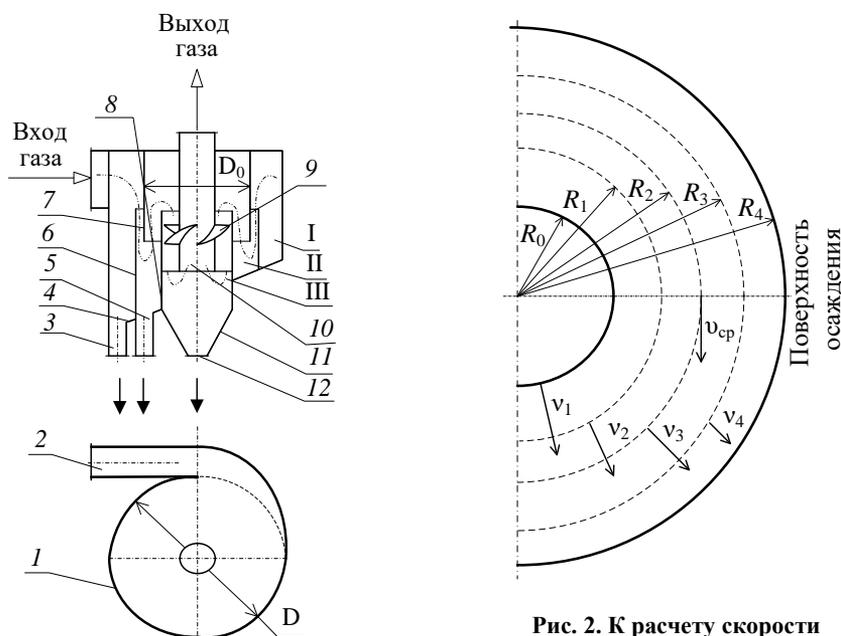


Рис. 1. Принципиальная схема пылеуловителя-классификатора

Рис. 2. К расчету скорости осаждения частиц для различных сечений

наружный диаметр канала $D = 0,35$ м; внутренний диаметр канала $D_0 = 0,21$ м; высота первой ступени пылеуловителя-классификатора $h_{ст} = 0,1155$ м.

В пылегазовом потоке выделим концентрические продольные сечения, находящиеся на расстоянии $R_0 = 0,1050$ м; $R_1 = 0,1225$ м; $R_2 = 0,1400$ м; $R_3 = 0,1575$ м; $R_4 = 0,1750$ м от центра вращения потока (рис. 2). Расчет проводим в следующей последовательности.

1. Задается расход пылегазового потока Q .

2. Определяется скорость прохождения расстояния от выбранного сечения до стенки осаждения v_i , то есть скорость, с которой частицы должны двигаться, находясь в данном сечении, чтобы достичь поверхности осаждения.

$$v_1 = \frac{R_4 - R_0}{\tau_{пр}}; \quad v_2 = \frac{R_4 - R_1}{\tau_{пр}}; \quad v_3 = \frac{R_4 - R_2}{\tau_{пр}}; \quad v_4 = \frac{R_4 - R_3}{\tau_{пр}}.$$

Время пребывания частиц в первой ступени $\tau_{пр}$, с, определяется как

$$\tau_{пр} = \frac{V_{ст}}{Q},$$

где $V_{ст}$ – объем первой ступени пылеуловителя-классификатора, м³, Q – объемный расход пылегазовой смеси, м³/с.

3. Определяется угловая скорость вращения потока в ступени.

Предположим, что режим движения потока турбулентный, поэтому считаем скорость движения во всех точках приблизительно одинаковой и равной средней скорости $v_{ср}$. Тогда угловая скорость вращения потока, с⁻¹,

$$\omega = \frac{v_{ср}}{R_{ср}} = \frac{Q}{S_{вх} R_{ср}}.$$

За средний радиус вращения $R_{ср}$ принимается радиус $R_2 = 0,1400$ м. Средняя скорость потока определяется через объемный расход Q и площадь входного патрубка $S_{вх} = 0,0085$ м².

4. Рассчитывается минимальный размер частиц, которые осядут на поверхности. Будем считать режим осаждения этих частиц ламинарным. Для ламинарного режима осаждения диаметр улавливаемых частиц определяется по формуле [7]

$$d_{ч} = \sqrt{\frac{18 \mu v_{ос}}{(\rho_{ч} - \rho) \omega^2 R}},$$

где R – радиус вращения, м.

Принимается, что скорость осаждения данных частиц $v_{ос}$ равна скорости прохождения расстояния от выбранного сечения до стенки осаждения, то есть $v_{ос1} = v_1$ (при $R = R_0$), $v_{ос2} = v_2$ (при $R = R_1$), $v_{ос3} = v_3$ (при $R = R_2$), $v_{ос4} = v_4$ (при $R = R_3$).

Результаты расчетов представлены в табл. 1. График зависимости минимального размера частиц, оседающих на поверхности в первой ступени пылеуловителя-классификатора, от объемного расхода пылегазовой смеси показан на рис. 3.

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением объемного расхода пылегазовой смеси размер улавливаемых частиц уменьшается, что связано с увеличением центробежной силы потока и, как следствие, увеличением скорости осаждения частиц. При этом, чем меньше расстояние до поверхности осаждения, тем меньше размер улавливаемых частиц, что связано с увеличением центробежной силы от центра к периферии канала первой ступени пылеуловителя-классификатора.

Таблица 1

**Результаты расчета минимального размера частиц,
улавливаемых в первой ступени пылеуловителя-классификатора
при различных расходах пылегазовой смеси**

Рассчитываемые параметры	Расход пылегазовой смеси, м ³ /с				
	0,136	0,126	0,102	0,076	0,051
Время пребывания частиц в первой ступени пылеуловителя-классификатора, с	0,052	0,057	0,070	0,093	0,140
Скорость осаждения частиц в сечении, м/с					
R_0, v_1	1,34	1,24	1	0,75	0,5
R_1, v_2	1	0,93	0,75	0,56	0,38
R_2, v_3	0,67	0,62	0,5	0,38	0,25
R_3, v_4	0,33	0,31	0,25	0,19	0,13
Угловая скорость вращения потока, с ⁻¹	114,29	105,68	85,71	64,29	42,86
Минимальный размер улавливаемых частиц в сечении, мкм:					
$R_0, d_{ч1}^{\min}$	10,00	10,40	11,50	13,30	16,30
$R_1, d_{ч2}^{\min}$	8,00	8,30	9,20	10,70	13,10
$R_2, d_{ч3}^{\min}$	6,10	6,40	7,10	8,20	10,00
$R_3, d_{ч4}^{\min}$	4,10	4,20	4,70	5,40	6,70

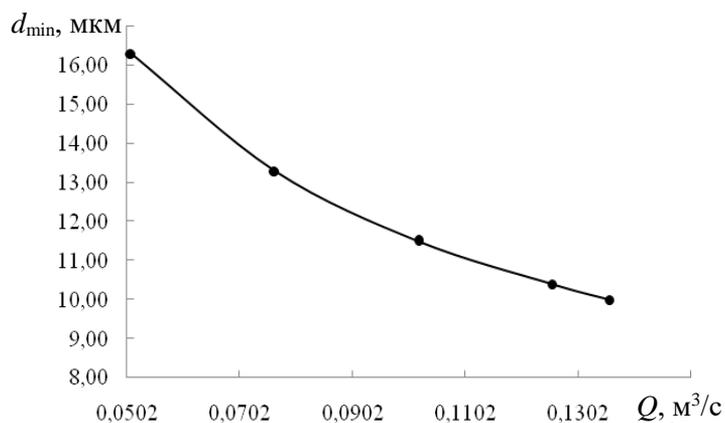


Рис. 3. График зависимости минимального размера улавливаемых частиц от объемного расхода пылегазовой смеси при $R = R_0$

Заключение

Предложена методика расчета минимального размера частиц, улавливаемых на первой ступени очистки нового пылеуловителя-классификатора. Получена зависимость $d_q^{\min} = f(Q)$. Представленная методика может быть использована для предварительной оценки эффективности работы аппарата и фракционного состава дисперсной фазы, уловленной на первой ступени очистки пылеуловителя-классификатора.

Список литературы

1. Сугак, А. В. Центробежные пылеуловители и классификаторы. Моделирование, расчет, проектирование : монография / А. В. Сугак, Е. В. Сугак. – Германия : LAP Lamber Academic Publishing GmbH & Co, 2012. – 226 с.
2. Чекалов, Л. В. Экотехника. Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов / Л. В. Чекалов. – Ярославль : Русь, 2004. – 424 с.
3. Сугак, Е. В. Процессы очистки газов в турбулентных газодисперсных потоках. Моделирование и интенсификация : монография / Е. В. Сугак. – Германия : LAP Lamber Academic Publishing GmbH & Co, 2011. – 308 с.
4. Смирнов, Д. Е. Совершенствование процесса сепарации частиц в инерционно-центробежном пылеуловителе-классификаторе : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Смирнов Дмитрий Евгеньевич. – Ярославль, 2011. – 127 с.
5. Юровская, М. А. Экспериментальные исследования пылеуловителя-классификатора / М. А. Юровская, Д. Е. Смирнов, А. В. Сугак, В. К. Леонтьев // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2014. – Т. 57, № 10. – С. 84 – 86.
6. Yurovskaya, M. A. Improving the Operating Efficiency of a Dust Collector-Classified / M. A. Yurovskaya, A. E. Lebedev, V. K. Leont'ev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2019. – Vol. 55, No. 3-4. – P. 324 – 328. doi: 10.1007/s10556-019-00622-9
7. Скобло, А. И. Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / А. И. Скобло, И. А. Трегубова, Ю. К. Молоканов. – М. : Химия, 1982. – 584 с.

Calculation of the Minimum Size of Particles Captured in the First Stage Dust Collector-Classified

M. A. Yurovskaya^{1✉}, V. K. Leontiev¹, A. E. Lebedev²

Departments: Chemical Technology of Organic Substances (1), barashevama@ystu.ru; Technological Machines and Equipment (2), Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

Keywords: settling time; minimum size of trapped particles; dust collector-classified; settling rate; centrifugal separation.

Abstract: The paper describes the principle of operation of a new high-efficiency dust collector-classified including three stages of dust and gas flow purification. The method of calculation of the minimum size of particles captured at the first stage of this device, based on the laws of particle deposition in the laminar regime, is proposed. Calculation of the minimum size of captured particles – foundry wastes is carried out. The dependence of the minimum size of captured particles on the gas flow rate, as well as the distribution of the minimum size of captured particles along the cross-section of the first stage is obtained.

References

1. Sugak A. V., Sugak E. V. *Centrobezhnye pyleuloviteli i klassifikatory. Modelirovanie, raschet, proektirovanie: monografiya* [Centrifugal dust collectors and classifiers. Modeling, calculation, design: monograph], Germany: LAP Lamber Academic Publishing GmbH & Co, 2012, 226 p. (In Russ.).

2. Chekalov L.V. *Ekotekhnika. Zashchita atmosfernogo vozduha ot vybrosov pyli, aerozolej i tumanov* [Ecotechnika. Protection of atmospheric air from emissions of dust, aerosols and fogs], Yaroslavl: Rus, 2004, 424 p. (In Russ.).

3. Sugak E.V. *Processy ochistki gazov v turbulentnyh gazodispersnyh potokah. Modelirovanie i intensivkaciya: monografiya* [Gas purification processes in turbulent gas-dispersed flows. Modeling and intensification: monograph], Germany: LAP Lamber Academic Publishing GmbH & Co, 2011, 308 p. (In Russ.).

4. Smirnov D.E. *PhD Dissertation (Engineering)*, Yaroslavl, 2011, 127 p. (In Russ.)

5. Yurovskaya M.A., Smirnov D.E., Sugak A.V., Leontiev V.K. [Experimental studies of a dust collector-classifier], *Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya* [Izv. universities. Chemistry and Chem. Technology], 2014, vol. 57, no. 10, pp. 84-86. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Yurovskaya M.A., Lebedev A.E., Leont'ev V.K. Improving the Operating Efficiency of a Dust Collector-Classifer, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2019, vol. 55, no. 3-4, pp. 324-328, doi: 10.1007/s10556-019-00622-9.

7. Skoblo A.I., Tregubova I.A., Molokanov Yu.K. *Processy i apparaty neftepererabatyvayushey i neftekhimicheskoy promyshlennosti* [Processes and devices of the oil refining and petrochemical industry], Moscow: Chemistry, 1982, 584 p. (In Russ.).

Berechnung der Mindestpartikelgröße, die in der ersten Stufe des Staubabscheider-Klassifikators erfasst werden

Zusammenfassung: Es ist die Beschreibung des Funktionsprinzips des neuen hocheffizienten Staubsammler-Klassierers vorgestellt, der drei Stufen der Staub- und Gasstromreinigung umfasst. Es ist die Methode zur Berechnung der Mindestgröße der in der ersten Stufe dieser Vorrichtung eingefangenen Partikel vorgeschlagen, die auf den Gesetzen der Partikelablagerung unter laminaren Bedingungen basiert. Die Berechnung der Mindestgröße der eingefangenen Partikel – Gießereiabfälle – ist durchgeführt. Die Abhängigkeit der Mindestgröße der abgeschiedenen Partikel vom Gasdurchsatz sowie die Verteilung der Mindestgröße der abgeschiedenen Partikel über den Querschnitt der ersten Stufe sind ermittelt.

Calcul de la taille minimale des particules captées dans le premier étage du collecteur de poussière

Résumé: Est donnée la description du principe du fonctionnement du nouveau collecteur de poussière-classificateur à haut rendement comprenant trois étapes de nettoyage du flux de poussière et de gaz. Est proposée une méthode de calcul de la taille minimale des particules captées dans le premier étage de cet appareil, basée sur la conomérisation des particules en mode laminaire. Est calculée la taille minimale des particules capturées – déchets de la fonderie. La taille minimale des particules captées dépend du débit de gaz, ainsi que la répartition de la taille minimale des particules captées sur la section transversale du premier étage.

Авторы: *Юровская Мария Андреевна* – старший преподаватель кафедры «Химическая технология органических веществ»; *Леонтьев Валерий Константинович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая технология органических веществ»; *Лебедев Антон Евгеньевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия.