

ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЗАКРУТКИ ПЫЛЕГАЗОВОГО ПОТОКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ В ЦИКЛОНАХ

Чалов В.А.¹, Чалов А.В.², Трофимченко В.Н.³

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород;

²ООО «Атакайцемент», Новороссийск;

³ООО «Эйр продактс центральная Азия», Ташкент

Ключевые слова: центробежное пылеосаждение, циклон, эффективность пылеулавливания, дополнительная закрутка потока, направляющее устройство, скорость частицы.

Аннотация. Актуальность процессов разделения пылесодержащих потоков в различных отраслях промышленности возрастает с ростом их мощностей и ужесточения экологических нормативов. Центробежное пылеулавливание нашло широкое применение в самых разных отраслях народного хозяйства ввиду низкой стоимости и простоты конструкции. Однако, существует также ряд технологических ограничений для применения циклонов. Описаны наиболее характерные проблемы циклонов, которые в значительной степени снижают их эффективность пылеосаждения. Определены направления повышения эффективности. Одним из наиболее исследуемых параметров является скорость и направление пылегазового потока. Управление этими параметрами возможно изменением конструктивных характеристик входного и выходного патрубков. Предложено и испытано конструктивное решение в виде направляющего устройства выхлопного патрубка. Определены основные конструктивно-технологические параметры разработанного устройства и подтверждены расчетные технико-экономические характеристики.

THE INFLUENCE OF ADDITIONAL SWIRLING OF THE DUST AND GAS FLOW ON THE EFFICIENCY DEDUSTING IN CYCLONES

Chalov V.A.¹, Chalov A.V.², Trofimchenko V.N.³

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod;

²Atakaycement LLC, Novorossiysk;

³Air Products Central Asia Group LLC, Tashkent;

Keywords: centrifugal dust deposition, cyclone, dust collection efficiency, additional flow rotation, guide device, particle velocity.

Abstract. The relevance of the processes of separation of dust-containing flows in various industries increases with the growth of their capacities and the tightening of environmental standards. Centrifugal dust collection has found wide application in a variety of sectors of the national economy due to its low cost and simplicity of design. However, there are also a number of technological limitations for the use of cyclones. The most typical problems of cyclones are described, which significantly reduce their dust deposition efficiency. Directions for increasing efficiency have been identified. One of the most studied parameters is the speed and direction of the dust and gas flow. These parameters can be controlled by changing the design characteristics of the inlet and outlet pipes. A design solution in the form of a guide device for the exhaust pipe was proposed and tested. The main structural and technological parameters of the developed device were determined and the calculated technical and economic characteristics were confirmed.

Введение. Рост темпов развития промышленности, неизбежно влечет за собой рост уровня загрязнения окружающей среды практически всеми отраслями. Особенно актуальна проблема защиты окружающей среды от выбросов загрязненного газа. Ежегодно, в атмосферу стационарными источниками выбрасывается около 17 млн.т (данные Росстата) загрязняющих веществ [1]. Из этого объема свыше 10% [2] составляют твердые взвешенные частицы или пыль, образующаяся в различных отраслях промышленности.

Процесс пылеулавливания в современных установках до достижения установленных государством нормативов требует значительных инвестиций, что в условиях непростой макроэкономической ситуации довольно сложная задача. В связи с этим, поддержание и поступательное развитие различных отраслей производства в рамках законодательства об

охране природы и ресурсосбережения часто оказываются тесно связаны с проблемой очищения отходящих технологических потоков газов от пыли.

За более чем столетнюю историю разработки и применения циклоны [3] получили наибольшее распространение среди устройств пылегазоочистки в самых разных отраслях народного хозяйства, как правило, в тех технологических переделах, где необходимым условием является сухая очистка отходящих потоков пылегазовой смеси. Этому в большей степени способствовала относительная простота устройства, высокая эксплуатационная надежность и ремонтпригодность при сравнительно небольших затратах на монтаж и эксплуатацию [4, 5].

Наряду с очевидными преимуществами центробежных аппаратов есть ряд факторов, препятствующих их исключительному доминированию. Основным лимитирующим фактором является недостаточная степень очистки полидисперсных пылегазовых потоков с преобладающим размером частиц менее 10 мкм, склонных к слипанию и агломерации. В связи с этим, область применения циклонов ограничивается размерами частиц, а также их физико-механическими свойствами.

Аэродинамика процессов пылегазоочистки в центробежных аппаратах представляет собой комплекс разнонаправленных потоков. Кроме тангенциального, задающего направление движения частиц пыли, потока выделяют вторичный поток, который, двигаясь вдоль конической стенки, захватывает отброшенные к стенке частицы и направляет их вниз к пылесборному бункеру. Очевидна высокая степень влияния данного потока на общий процесс выделения частиц пыли. Преодолевая направленную вверх составляющую центробежной силы, которая значительно больше ускорения свободного падения, он позволяет материалу, выделенному из потока и отброшенному к стенкам, двигаться вниз к пылесборному бункеру [6].

Степень очистки, однако, можно увеличить повышением скорости потока в аппарате, но вместе с тем это приводит к росту гидравлического сопротивления аппарата, обусловленному образованием мощного хаотического потока в выхлопной трубе циклона, что приводит к росту энергозатрат и стоимости очистки единичного объема пылегазовой смеси. Этот факт также создает определенные рамки применимости данных типов пылеулавливающей техники в части производительности и эффективности.

Анализ патентной документации на тему проблем применения и эксплуатации циклонных аппаратов в промышленности строительных материалов и металлургии показывает достаточно равномерное распределение направлений исследования конструктивных элементов центробежных аппаратов (рис. 1).

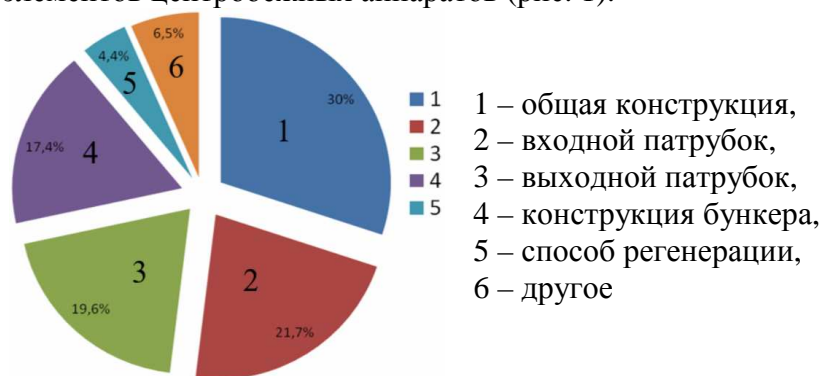


Рис. 1. Распределение основных направлений модернизации центробежных аппаратов

Одним из перспективных направлений совершенствования процесса центробежного пылеулавливания в противоточном циклоне является более эффективное использование энергии крутки пылегазового потока в циклоне, путем использования направляющих или распределительных устройств.

Эти устройства могут изменять отдельные составляющие скорости частиц материала при их попадании в зону разделения, влиять на кинематические и динамические

характеристики пылегазового потока. Это дает дополнительные возможности оптимизации процесса разделения и его эффективности [7, 8].

Применение направляющих устройств позволяет увеличить тангенциальную составляющую скорости пылегазового потока в циклоне, что приводит к росту центробежных сил, действующих на частицы пыли. В результате чего, при увеличении доли энергии, идущей на вращение потока, возрастает эффективность пылеулавливания циклона, а, следовательно, уменьшается нагрузка на следующие ступени пылегазоочистного оборудования аспирационной системы.

Материалы и методы исследований. Разработан ряд конструктивных решений, позволяющих повысить эффективность эксплуатации центробежных аппаратов. Для проведения экспериментальных исследований использовался лабораторный аспирационный комплекс.

Установка экспериментального стенда представляет собой набор машин и механизмов, используемых в цементной промышленности для пылегазоочистки, а именно: циклон ЦН-15-400, рукавный фильтр, вентилятор высокого давления, установленный за рукавным фильтром во избежание попадания в него пыли. Тракт системы представляет собой трубопровод длиной 8 м и диаметром 150 мм с набором необходимых технологических устройств для отбора проб и контроля параметров пылегазового потока. На входе воздуховода смонтирован шнековый пылепитатель, позволяющий плавно регулировать подачу пыли в систему, задавая необходимую ее концентрацию. Эффективность пылеулавливания циклонного аппарата определяется весовым методом, скорость и давление – прибором “TESTO 435-4”. Для проведения эксперимента выбрана пыль с участков помола сырья цементного производства, для которых сделан гранулометрический анализ в лаборатории предприятия на лазерном анализаторе частиц “MicroSizer 201”, по результатам которого (рис. 2) было выявлено, что преобладающий размер частиц находится в пределах 5-11 мкм, что соответствует нижней границе оптимального размера для центробежного улавливания. Более детальный анализ фракционно-дисперсного состава данного материала приводится в работе [9], а также описаны его особенности с точки зрения процессов разделения и агломерации.



Таблица соответствия размеров частиц (D, мкм) заданным значениям весовой доли

пыль с смеси.14.07.2	0.87	1.45	2.74	3.19	5.15	5.87	7.32	11.0	17.0	600
P, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Таблица весовой доли частиц (P, %), соответствующих заданным значениям размеров частиц

пыль с смеси.14.07.2	76.7	93.4	97.7	97.8	98	98.8	99.7	100	100	100
D, (мкм)	10	20	50	63	71	100	200	300	400	500

В таблицах приводятся значения весовых долей, содержащихся в интервалах размеров меньше указанного диаметра

Рис. 2. Результаты гранулометрического анализа сырьевой смеси

Сущность предложенной и осуществленной в циклоне ЦН-15-400 модернизации заключается в изменении конструкции выхлопной трубы, обеспечивающей принципиально новую организацию выхода очищенного газа через боковые отверстия тангенциально, что позволит уменьшить влияние вихря в выхлопной трубе на сопротивление аппарата.

Проведенные поисковые экспериментальные исследования позволили определить основные факторы, влияющие на эффективность выделения твердых частиц из пылегазового потока и области их варьирования, составить план и программу дальнейших исследований, реализация которых позволил определить рациональные области исследуемых факторов, сравнить их с данными математического моделирования. Выявить слабые и сильные стороны предлагаемой модернизации, определить техническую и экономическую целесообразность внедрения на производстве.

Предложен циклон [10], отличающийся иным принципом создания вращающегося потока в корпусе аппарата. Технологически новая конструкция предполагает в дополнение к основной крутке потока, которая достигается тангенциальным входом потока в циклон организацию дополнительной закрутки потока в центральной отводящей трубе за счет установки разработанного лопаточного направляющего устройства (ЛНУ).

Предлагаемая конструкция циклона с направляющим устройством выхлопного патрубка (рис. 3) состоит из корпуса 1, входного патрубка 6, выходного патрубка 2 с ЛНУ 3, направляющих щитков 4 установленных соосно относительно оси аппарата 5, пластины запорной 7 с обтекателем, оптимизирующим переход пылегазового потока из корпуса циклона в выхлопной патрубков. Благодаря направляющему приспособлению 3 восходящий поток приобретает дополнительное ускорение, на входе в выхлопной патрубков, что ведет к росту угловой скорости и центробежных сил, действующих на частицы пыли в корпусе циклоне, повышая степень очистки аппарата.

Угол наклона направляющих лопаток α может меняться в интервале $90 - \beta < \alpha < \pi/2$ (рис. 4, где β – угол между касательной точки крепления лопатки и полкой), с увеличением угла α степень раскрытия щели возрастает. Ширина входного канала d , образованного полкой и стенкой ЛНУ, равна:

$$d = BC = AB \sin(\alpha - \beta) = 2r_1 \sin \beta \sin(\alpha - \beta), \quad (1)$$

где r_1 – радиус выхлопной трубы, м.

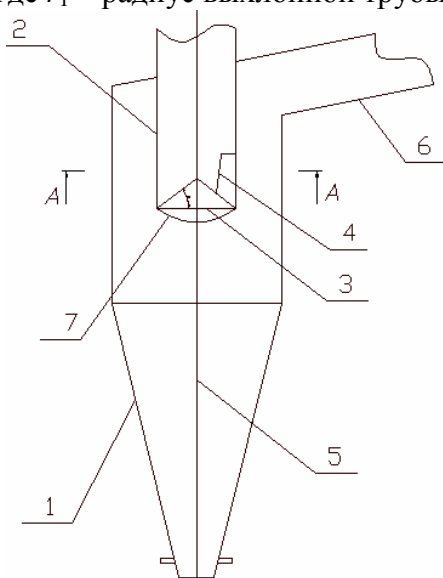


Рис. 3. Схема циклона с ЛНУ

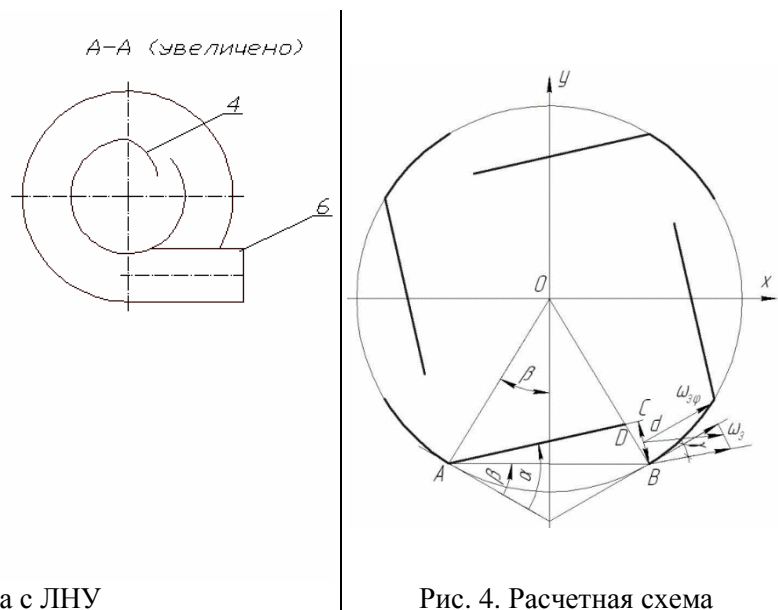


Рис. 4. Расчетная схема

Центральный вихревой поток очищенного газа с помощью установленного обтекателя 7 преобразуется в кольцевую струю, которая засасывается через щели направляющего устройства. Скорость входа газа ω_3 в каналы ЛНУ определяется его объемным расходом Q и суммарной площадью каналов:

$$\omega_3 = \frac{Q}{ndh_3}, \quad (2)$$

где n – количество щелей ЛНУ, шт; h_3 – высота щели, м; d – ширина раскрытия выходной щели, м.

Коэффициент местного сопротивления ЛНУ зависит от отношения \bar{f} суммарной площади поперечного сечения входных каналов к площади поперечного сечения выхлопной трубы:

$$\bar{f} = \frac{ndh_3}{\pi r_1^2} = \frac{2nh_3 \sin \beta \sin(\alpha - \beta)}{\pi r_1^2}. \quad (3)$$

Результаты. Результаты экспериментов на полупромышленном противоточном циклоне НИИОГАЗ типа ЦН-15 подтверждают, применение ЛНУ в конструкции аппарата позволяет повысить его эффективность на 7,2% (η) в сравнении со стандартным исполнением. При этом гидравлическое сопротивление не изменяется. Также было установлено, что установка ЛНУ позволяет добиться снижения гидравлического сопротивления более 10% (Δp) при условии сохранения эффективности пылеулавливания на уровне стандартного исполнения аппарата равном 84,4%. Что в свою очередь приводит к существенному снижению энергозатрат на процесс очистки отходящих газов в целом. Так снижение гидравлического сопротивления на величину 10% дает снижение уровня мощности затрачиваемой электродвигателем аспирационной воздуховулки на 6,2%.

Обработка результатов экспериментальных исследований, на аспирационной установке с циклоном ЦН-15-400, снабженным ЛНУ, дала нам ряд уравнений регрессии, которые позволяют оценить влияние конструктивно-технологических параметров на процесс пылеулавливания, а именно: α – угла наклона направляющих лопаток, град; h_3 – высоты выходной щели, м; n – концентрации частиц в воздушном потоке, г/м³; v – скорости потока в циклоне, м/с, на эффективность пылеулавливания – η , %.

На основе полученных уравнений регрессии были построены поверхности отклика функции эффективности пылеулавливания (рис. 5). Анализ графиков позволяет нам дать оценку влияния каждого из факторов, а также уровню их влияния.

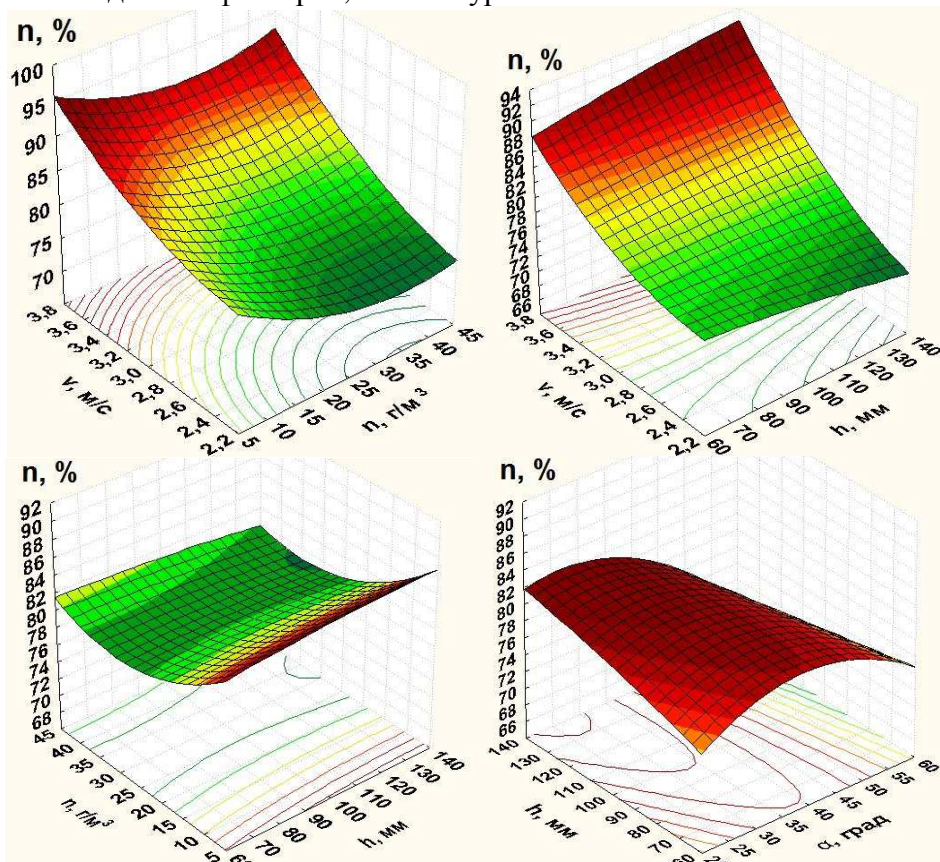


Рис. 5. Зависимости η – эффективности пылеулавливания от высоты выходной щели – h_3 , угла наклона лопаток – α , скорости потока – v , запыленности потока – n

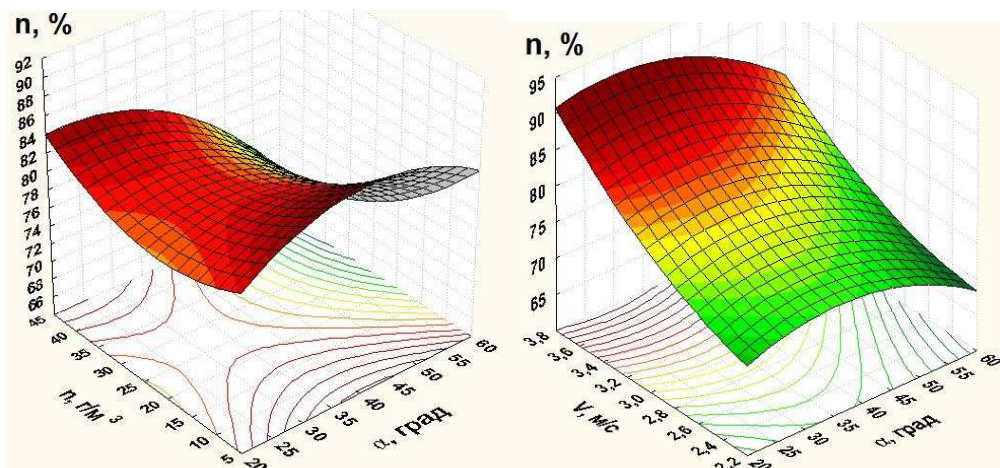


Рис. 5. Продолжение

Выводы. Наибольшее влияние на эффективность пылеулавливания оказывает скорость пылевоздушного потока в аспирационной установке v . В данном случае значение определяет величину центробежной силы, действующей на частицы пыли. Это объясняет быстрый рост центробежной силы с увеличением скорости пылегазового потока в газоходе. В результате большее количество частиц осаждается на стенках корпуса с последующим транспортированием в пылесборный в бункер.

Затем, по уровню влияния на эффективность, следуют угол наклона направляющих, высота щели и концентрация пыли.

С ростом угла наклона направляющих лопаток увеличивается и эффективность пылеулавливания благодаря увеличению центробежной составляющей потока как в выходном патрубке, так и в корпусе аппарата в целом.

Увеличение концентрация частиц пыли приводит к росту эффективности, что в значительной степени объясняется механизмами кинематической коагуляции частиц пыли в потоке. Укрупненные частицы имеют большую центробежную силу, следствием чего является интенсификация осаждения частиц на стенках корпуса циклона и рост эффективности пылеулавливания аппарата.

Диапазон оптимума взаимного влияния конструктивных параметров определяется в следующих рамках: $22^\circ \leq \alpha < 47^\circ$ и $75 \text{ мм} \leq h_3 < 103 \text{ мм}$.

Заключение. Согласно результатам математического описания процесса пылеулавливания, в циклоне с ЛНУ дополнительная закрутка газа на входе в выхлопную трубу способствует интенсификации вращения пылегазового потока по всему объему аппарата, что приводит к росту центробежных сил, действующих на отдельную частицу, что ведет к росту эффективности центробежной пылегазоочистки.

Экспериментальные исследования стандартного циклона ЦН-15-400 с ЛНУ показали рост значений эффективности пылеулавливания в пределах от 7% до 10,2%.

Список литературы

1. Россия в цифрах. 2017: Крат. стат. сб. / Росстат. – М., 2017. – 511 с.
2. Охрана окружающей среды в России. Стат. сб. / Росстат. – М., 2018. – 125 с.
3. А.с. №1130408 СССР. Циклон / В.С. Богданов, В.С. Севостьянов, Н.С. Богданов, А.Я. Литвин, Л.И. Пономарев. – Заявка №3646187 от 28.09.1983; опублик. 23.12.1984, Бюл. №47.
4. Куцев Л.А., Энергосберегающие аппараты для улавливания твердой и жидкой фазы аэрозолей. – Белгород: Изд-во «Логия», 2002. – 187 с.
5. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 390 с.
6. Шияев М.И., Шияев А.М., Афонин П.В., Стрельникова Н.А. Исследование процесса пылеулавливания и гидравлического сопротивления в каскаде прямооточных циклонов // Известия вузов. Строительство. – 1999. – №8. – С. 45-48.
7. Барский М.Д. Оптимизация процессов разделения зернистых материалов. – М.: Недра, 1978. – 168 с.
8. Clark M. Separation efficiency // International Cement Review (ICR). 2004, September, p. 38.

9. Трофимченко В.Н., Мордовская О.С., Ханин С.И. Исследование агрегатов частиц грубомолотого мергеля и процесса их дезагрегации в сепараторе с устройством в виде многозаходных лент // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №12. – С. 114-120.
10. Патент №106147 РФ. Циклон / В.А. Чалов, Л.А. Кушев, В.Г. Шаптала. – Заявка №2010148520/05 от 26.11.2010; опубл. 10.07.2011, Бюл. №20.

References

1. Russia in numbers. 2017: Short Stats / Rosstat. – М., 2017. – 511 p.
2. Environmental protection in Russia. Stat. Sat. / Rosstat. – М., 2018. – 125 p.
3. А.с. No. 1130408 USSR. Cyclone / V.S. Bogdanov, V.S. Sevostyanov, N.S. Bogdanov, A.Ya. Litvin, L.I. Ponomarev – Appl. No. 3646187 from 28.09.1983; publ. 23.12.1984, Bul. No. 47.
4. Kushchev L.A. Energy-saving apparatus for trapping solid and liquid phases of aerosols. – Belgorod: Publ. house Logia, 2002. – 187 p.
5. Uzhov V.N., Waldberg A.Yu., Myagkov B.I. Purification of industrial gases from dust. – М.: Chemistry, 1981. – 390 p.
6. Shilyaev M.I., Shilyev A.M., Afonin P.V., Strelnikova N.A. Investigation of the process of dust collection and hydraulic resistance in a cascade of direct-flow cyclones // Proceedings of universities. Building. 1999, no. 8, pp. 45-48.
7. Barsky M.D. Optimization of processes for separating granular materials. – М.: Nedra, 1978. – 168 p.
8. Clark M. Separation efficiency // International Cement Review (ICR). 2004, September, p. 38.
9. Trofimchenko V.N., Mordovskaya O.S., Khanin S.I. The study of aggregates of particles of coarse marl and the process of their disaggregation in a separator with a device in the form of multi-feed tapes // Bulletin of BSTU n.a. V.G. Shukhov. 2016, no. 12, pp. 114-120.
10. Patent No. 106147 RU. Cyclone / V.A. Chalov, L.A. Kushchev, V.G. Shaptala. – Appl. No. 2010148520/05 from 26.11.2010; publ. 10.07.2011, Bull. No. 20.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Чалов Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент	Chalov Vladimir Aleksandrovich – candidate of technical sciences, associate professor
Чалов Александр Васильевич – начальник производства	Chalov Alexander Vasilievich – head of production department
Трофимченко Владимир Николаевич – кандидат технических наук, главный инженер	Trofimchenko Vladimir Nikolaevich – candidate of technical sciences, chief engineer
chalov-v@yandex.ru	

Получена 11.06.2024