

УДК 621.928:504.5

С. А. Кошкарев**ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ПРИ СНИЖЕНИИ ВЫБРОСОВ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ В СТРОЙИНДУСТРИИ**

Рассмотрен вопрос повышения экологической безопасности при снижении выбросов пыли системами обеспыливания аспирации стройиндустрии. Применение высокоэффективных устройств мокрой очистки с комбинированной схемой, снижающих проскок улавливаемых пылевых частиц-агломератов в обеспыливающих системах аспирации, является одним из перспективных и эффективных способов реализации эколого-охранных процессов в политике экологической безопасности производства ряда дисперсных сыпучих строительных материалов. Предложен перспективный путь сокращения выбросов пыли в атмосферу в производстве цемента, представлены данные промышленного обследования систем аспирации и результаты испытания опытно-промышленных установок в производстве цемента, а также обобщенные результаты натурного определения мощности пылевых выделений, пыли керамзита и песка, выделяющихся от оборудования на участках, рабочих местах и аспирации предприятий по производству керамзита и цемента. При разработке новой конструкции пылеуловителя были использованы результаты дисперсионного анализа и экспериментального определения степени проскока улавливаемой пыли в устройстве. Приведено описание одной из предложенных конструкций опытно-промышленных установок с пылеуловителем мокрой очистки, прошедшей испытания в промышленности. Выполнены эксперименты по оценке степени проскока частиц пыли. На основе статистической обработки результатов экспериментов получены зависимости коэффициента проскока частиц пыли в пылеулавливающих устройствах в исследованной области аэродинамических режимов работы.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пыль, керамзит, цемент, песок, пылеуловитель, мокрая очистка, стройматериал, проскок, дисперсионный анализ, выброс, атмосфера, система, обеспыливание, аспирация.

The article is devoted to the improvement of environmental safety while reducing dust emissions by decreasing dusting schemes of aspiration in construction industry. The use of high-performance devices with combined scrubbing circuit, reducing leakage's degree of dust particles throw out from aspiration cutting dust schemes is one of the most promising and effective ways to implement environmental-protection policy processes in environmental safety of a number of dispersion-bulk construction materials. Perspective approach to reduce dust emissions in cement producing enterprises is described in this article. Data on industrial study of aspiration systems and the results of tests of experimental industrial installations in cement production are presented, as well as summary results of full-sized determination of power of dust emission, dust of expanded clay and sand produced by the equipment, workplaces and aspiration schemes of expanded clay and cement manufacturing enterprises. The results of analysis of variance dimension dust particles and experimental determination of the degree of slipping and leaking out of collecting dust devices were used for elaboration, design and development of the new wet dust cleaner-separator. The article provides the description of one of the offered structures of experimental industrial installations with wet cleaning of dust collector that were tested at the industrial plants. Experiments to get leakage's degree of dust particles are carried out. On the basis of statistical processing of the experimental results were obtained the dependences of the coefficient of leakage of dust's particles in these wet dust cleaners-separators within the studied work range of aerodynamic modes.

К e y w o r d s: dust, expanded clay, cement, sand, cleaning apparatus, wet cleaning, construction material, leakage, dispersed analysis, emission, atmosphere, scheme, dust decreasing, aspiration.

В последние годы осуществление государственного проекта «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» (Постановление Правительства РФ № 323 от 15.04.2014 г. с изм. и допол. в ред. от 02.05.2014 г.) привело к значительному

увеличению объемов строительства. Обеспечить выполнение решений государства в области строительства может только развитие всего комплекса стройиндустрии. Производство цемента и искусственно получаемых заполнителей является одним из наиболее важных. Производство бетонов и строительных смесей, легких бетонов, обладающих высокоэффективными теплоизоляционными свойствами, конструкционно-теплоизоляционным потенциалом, играет важнейшую роль для успешного развития индустриального крупнопанельного домостроения в нашей стране [1]. При этом в России имеет место значительное увеличение объемов производства цемента для строительства жилых домов, а также объектов инфраструктуры в инженерно-транспортной системе и теплоэлектроэнергетике.

До настоящего времени цемент, несмотря на развитие технологий производства других эффективных материалов, остается одним из основных стройматериалов. Количество цемента, произведенного в России в 2014 г., составляет более 70 млн т и продолжает расти. Объем производства цемента в мире в 2011 г. составил более 3,60 млрд т при годовом росте 7,8 %. Темпы развития цементной промышленности в 1,5...2 раза превышают темпы роста мирового ВВП¹. Производство керамзитового гравия и песка (искусственных пористых заполнителей) для легких бетонов также является одной из наиболее развивающихся отраслей строительной индустрии. Согласно статистике производства продукции России², объем производства керамзита за 2013 г. составил около 140 млн м³. Основные запасы минерального сырья для производства цемента и керамзита расположены в Южном, Приволжском и Центральном федеральных округах России. Значительная часть промышленного производства керамзита, цемента, строительных материалов и смесей расположена в ЮФО, в частности в Волгоградской области.

Производство искусственных пористых заполнителей (керамзитового гравия, песка) представляет собой сложный и негативный по отношению к окружающей среде ряд технологических операций, создающих дополнительную техногенную нагрузку, в частности на атмосферный воздух, при осуществлении последовательности операций переработки сырьевых сыпучих компонентов, включая их термообработку (сушку и обжиг), транспортировку, перегрузку сыпучего сырья, материалов и готовой продукции, т. е. керамзитового гравия и песка. Основные стадии технологического процесса производства керамзита: добыча сырья в карьере; транспортирование сырья в глинозапасник; переработка сырья, получение сырцовых гранул и их термическая обработка (сушка, обжиг, последующее охлаждение готового продукта); сортировка, частичное дробление полученного продукта; складирование и отгрузка материала [2—4]. В ходе данных технологических операций выделяется значительное количество вредных ингредиентов, полидисперсной пыли. Керамзитовая пыль удаляется от источников выделений системами местной вытяжной вентиляции и составляет наибольшую массу в выбросах в атмосферу предприятиями данной отрасли [2]. Описание технологического процесса производства керамзита широко представлено в литературе [2—5].

¹ URL: perspektivy.info/book/mirovaja_cementnaja_promyshlennost_2012-06-06.htm (дата обращения: 01.10.2015).

² URL: marketing1.ru/rus4.html (дата обращения : 01.10.2015).

Производство цемента может быть определено следующей последовательностью операций: добыча известняка и глины (если необходимо, то и корректирующих добавок); подготовка сырьевых материалов и приготовление из них однородной смеси заданного состава; обжиг сырьевой смеси материалов до спекания с получением клинкера; помол клинкера в порошок с некоторым количеством гипса. Конечная стадия процесса — фасовка в тару и отгрузка потребителю. В рецептуру различных марок цемента могут включаться активные минеральные и другие добавки. В качестве сырья в технологическом процессе производства цементов применяется ряд природных ископаемых материалов. Большая их часть представляет минеральные сыпучие компоненты различного гранулометрического состава: известняк, глина, шамот, песок, мергель. Сведения о технологическом процессе производства цементов широко представлены в литературе [6—8]. Следует отметить, что получение клинкера является наиболее сложным и энергоемким процессом, что предполагает значительные приведенные затраты (на строительство и эксплуатацию). При этом получение клинкера имеет также негативный экологический аспект.

Для снижения негативного техногенного влияния на атмосферный воздух и окружающую среду предприятия по производству керамзита, цемента и строительных конструкций с использованием керамзитового гравия и песка оснащаются системами местной вытяжной вентиляции с пылеулавливающим оборудованием. Для повышения экологической безопасности при все более возрастающем объеме выпускаемой продукции предприятиями по производству керамзита и цемента и, следовательно, уменьшения негативного техногенного воздействия данных отраслей на атмосферный воздух требуется снижение объемов выбросов. Одним из путей и эффективных способов уменьшения объемов выбросов пыли является совершенствование и реконструкция существующих пылеулавливающих установок [2, 9, 10].

Анализ литературных данных показывает также, что в последние годы не ослабевает научный интерес к теории, описанию процессов пылеочистки выбросов вытяжных вентиляционных систем в устройствах сухой инерционной и мокрой очистки обеспыливающих систем. При этом новые устройства очистки, разработанные на основе результатов проведенных исследований, находят практическое применение в промышленности и стройиндустрии. Следует отметить, что системы местной вытяжной вентиляции, аспирации оснащены системами обеспыливания, состоящими, как правило, из нескольких ступеней пылеочистки выбросов [9—11]. В таких многоступенчатых системах применяются устройства сухой (преимущественно инерционной) и мокрой очистки. Реализуемые в них при последовательной установке нескольких устройств процессы имеют значительные величины аэродинамического сопротивления и поэтому энергоемки [10, 11]. Установки с многоступенчатой цикличностью очистки имеют достаточно высокую стоимость и сложны в эксплуатации [9, 11].

В статье [12] представлены результаты исследования пылеулавливающих систем с тремя аппаратами ВЗП, установленными последовательно. Установка с частичной рециркуляцией, разработанная и описанная в работе [12], способствует лучшей сепарации мелкодисперсных частиц пыли из пылегазового потока при надежной работе обеспыливающей системы.

В статье [13] было предложено использовать модель турбулентной диффузии с экспериментально определяемыми гидравлическими размерами частиц по данным измерения скорости осаждения частиц. Экспериментальные измерения выполнялись с использованием компьютерного моделирования траекторий движения частиц. Результатом проведенного исследования было определение эффективности улавливания искр металла в противоточном циклоне с применением нестандартной модели конечной турбулентной диффузии.

В работе [14] отмечено, что на эффективность очистки пылевоздушного потока в системах обеспыливания местной вытяжной вентиляции оказывают существенное влияние многочисленные факторы. Это обстоятельство имеет большое значение при выборе систем очистки воздуха, которые должны обеспечивать эффективную организацию воздухообмена в производственном помещении. В статье приведены результаты исследования эффективности улавливания искр в циклоне предложенной конструкции системы аспирации. При этом учитывалось изменение размера искр, образующихся при сварке металлов.

В статье [15] приведены результаты исследования влияния вращающегося потока газа на оседание движущихся частиц в циклоне с использованием модели турбулентной диффузии. При разработке и оптимизации конструкции циклона была использована математическая модель, учитывающая влияние турбулентности вращающегося потока на движение частиц.

Кроме разработки новых конструкций центробежно-инерционных пылеуловителей и многоступенчатых очистных систем с последовательной их установкой, ведутся работы по совершенствованию и внедрению в промышленность и стройиндустрию других типов пылеулавливающих устройств, например аппаратов со встречными закрученными потоками (ВЗП). В работе [16] представлены результаты исследований движения частиц пыли в закрученных потоках в подводящих воздуховодах ВЗП с применением компьютерного моделирования. Полученные данные были применены также для расчета аэродинамических потерь давления как в воздуховодах перед аппаратами ВЗП, так и в целом данных пылеуловителей. При этом значения величины эффективности улавливания пыли в ВЗП по модели в аэродинамических режимах сравнивались с результатами экспериментальных исследований сепарации пыли кварца из пылевоздушного потока и имели хорошее совпадение [16].

Развивается также направление исследований, связанных с изучением закономерностей массообмена в системе «газ — жидкость — твердое тело» с применением экспериментальных методов, численного моделирования гидроаэродинамики потоков [17—20]. В новых, более эффективных конструкциях устройств мокрой очистки газов и жидкостей (гидроциклонов, скрубберов и т. п.) также используются центробежно-инерционные механизмы сепарации пыли из пылегазожидкостных потоков.

В работе [17] была разработана конструкция гидроциклона для получения трех типов концентратов бентонита. Было выполнено моделирование и оптимизация параметров в интервале рабочих режимов эксплуатации гидроциклона в зависимости от трех факторов: давления на входе в устройство, диаметра вихря и выходного диаметра. Математические уравнения модели были получены с применением компьютерного моделирования с использова-

нием метода наименьших квадратов при помощи программы Minitab 15. Была получена функциональная зависимость (функция отклика) второго порядка.

В статье [18] были проведены исследования сепарации частиц из вязких жидкостей в гидроциклоне разработанной конструкции. Определены функциональные зависимости эффективности процесса удаления частиц взвешенных в жидкости веществ. Было выполнено численное моделирование (CFD) устройства, позволившее определить схему движения потоков и влияние вязкости жидкости на интенсивность крутки потока в гидроциклоне. Полученные результаты исследования функции имели высокую степень достоверности.

Влияние скорости потока и распределения частиц по размерам на входе в устройство, а также сферичности и концентрации частиц во входном патрубке на эффективность сепарации в гидроциклоне было изучено в работе [19]. Авторами был разработан и исследован мини-гидроциклон (модель диаметром 5 мм). В выполненном исследовании были изучены скорость в подающем потоке газа патрубке, распределение частиц по размерам, сферичность и концентрация частиц на входе и их влияние на эффективность сепарации пыли в мини-гидроциклоне новой конструкции. В результате проведенного исследования был установлен эффект, названный авторами «эффектом рыболовного крючка». Для данного гидроциклона было установлено, что эффективность сепарации возрастает с уменьшением размера частиц, что приводит к возникновению «эффекта крючка» — зацепления для частиц с диаметрами менее 15 мкм. Было установлено, что унос мелких частиц происходит в результате воздействия крупной частицы. Влияние данного эффекта на процесс улавливания возрастало с увеличением скорости потока на входе в мини-гидроциклон. При увеличении скорости потока на входе в мини-гидроциклон более крупные частицы, имеющие большие скорости скольжения, увлекают за собой мелкие частицы, тем самым увеличивая эффект зацепления, или «эффект крючка». Результаты исследования показали, что для сферических частиц «эффект крючка» имеет в большей степени выраженный характер по сравнению с частицами, имеющими несферическую форму. Было установлено, что относительный размер частиц и скорость на входе в мини-гидроциклон играют наиболее важную роль в возникновении «эффекта крючка».

Гидроциклоны широко применяются не только как природоохранные устройства, но и как технологическое оборудование. Известно применение гидроциклонов в горнодобывающей промышленности для концентрирования и предварительного обезвоживания шламов. Так, например, авторами статьи [20] был разработан и исследован гидроциклон новой конструкции с конической фильтрующей стенкой. В данной работе экспериментально исследовалась степень улавливания твердых веществ. При этом проводилось численное моделирование гидродинамики (CFD). Было изучено влияние на крутку потока диаметра фильтрующего гидроциклона. Результаты исследований показали, что производительность процесса разделения была значительно улучшена с применением предложенной новой модификации гидроциклона с фильтрующей стенкой.

Известно, что получить решение системы уравнений Навье — Стокса для однофазного потока «идеальной» жидкости в трехмерных пространственных координатах без упрощений физической картины в виде конечных математических функций не представляется возможным. Для обеспечения замкнутости

системы в уравнениях переноса и потери (диссипации) кинетической энергии используются те или иные допущения. Например, в работе [24] использована k — ϵ модель турбулентности. Для моделирования изменения падения давления для циклонных сепараторов, оптимизации циклонов может быть использованы модели вида Крининга (Со — Крининга) [21], а также другие модельные представления на основе CFD.

Известно, что даже преодоления основной проблемы моделирования — масштабного перехода при разработке пылеулавливающих устройств — в общем случае не представляется возможным. При этом должны использоваться специальные технические решения и методы осуществления масштабного перехода от экспериментальных моделей к установкам, внедряемым в промышленность и стройиндустрию. С увеличением диаметра исследованных в лабораторных условиях моделей конструкций пылеуловителей D_m до величины промышленной установки $D_{пу}$ нарушается один из наиболее важных принципов теории подобия — принцип геометрического подобия. Необходимым условием успешного масштабирования является неизменность отношения характерных размеров, например отношение высоты H к диаметру D для модели и промышленной установки $D_{пу}$: $(H_m / D_m) = (H_{пу} / D_{пу}) = \text{const}$. Для более точного достижения подобия аэродинамической картины и, следовательно, совпадения результатов, получаемых на модели и промышленной установке, характерный размер пылеулавливающего устройства должен оставаться равнозначным. Одним из известных способов осуществления масштабирования является увеличение производительности устройств, в том числе и пылеуловителей, посредством увеличения числа исследованных в лабораторной модели аппарата ячеек (но не диаметра $D_{пу}$). При этом в пылеулавливающем устройстве устанавливается параллельно по ходу потока очищаемого газа необходимое число ячеек, исследованных в лабораторной модели аппарата. Кроме того, значение геометрического комплекса подобия, представляющего отношение размера частиц пыли, сепарируемых из пылегазового потока очищаемого газа (в расчете, например, на среднемедианный диаметр), к характерному размеру пылеулавливающего устройства $D_{пу}$, остается также неизменным и для модели промышленной установки: $(\delta_{50} / D_m) = (\delta_{50} / D_{пу}) = \text{const}$. При этом среднемедианный диаметр частиц пыли δ_{50} определяется на основе обработки результатов дисперсионного анализа, выполняемого на установке [22]. В этом случае при седиментации проб фактически измеряется гидравлически эквивалентный размер частиц пыли [13, 15, 22—24]. Это также позволяет использовать зависимости, полученные для степени проскока частиц пыли на модели, при разработке новых полномасштабных промышленных пылеулавливающих устройств систем обеспыливания выбросов.

Проведенный обзор только небольшой части научно-технической литературы показал, что дальнейшее изучение закономерностей процесса сепарации пыли в пылеуловителях мокрой очистки с использованием инерционного механизма улавливания является динамично развивающимся направлением научно-технических исследований. Интенсификация процесса улавливания пыли в устройствах мокрой очистки и сушки, разработка и совершенствование новых модификаций остаются актуальными и в настоящее время.

Появление новых конструкций требует теоретического и экспериментального изучения процессов в таких устройствах [24, 25].

Основными проблемами эколого-охранного комплекса на предприятиях стройиндустрии является загрязнение атмосферы выбросами пыли. Это подтверждается проведенными исследованиями на ряде предприятий по производству керамзита и цемента. Так, например, в работах [2, 23, 24] отмечено возрастающее негативное воздействие данных отраслей стройиндустрии. Установлено, что в стройиндустрии от целого ряда источников выбросов в атмосферу поступают различные виды пыли, что существенно загрязняет воздушный бассейн урбанизированных территорий. При этом в производстве цемента выделяется ряд пылевых ингредиентов, основное количество которых составляет пыль цемента, песка и другие виды пыли с содержанием SiO_2 20...70 %, а также с содержанием SiO_2 более 70 %. При производстве керамзита выделяется и выбрасывается в атмосферный воздух пыль керамзита и глины, а также и другие виды пыли с содержанием SiO_2 20...70 %.

При обследовании ряда предприятий по производству цемента и керамзита и соответствующей выборки систем аспирации проводилось изучение пылевой обстановки с определением удельных пылевыведений и концентраций пыли на участках приема и выгрузки известняка и песка. Результаты показали, например, что на постах перегрузки песка, известняка и глины выделяется пыль с удельным выделением $C_{\text{п}} = 2 \text{ кг/м}^3$. Проведено исследование пылевой обстановки воздуха рабочей зоны данного ряда помещений в производстве цемента и керамзита. Запыленность пылевоздушного потока, поступающего от транспортирующих механизмов (конвейеров, мест перегрузки, течек в бункеры-силосы, бункеров-силосов) и из технологических объемов бункеров-смесителей, грануляторов и печей обжига в системы аспирации может достигать на начальных участках до 25 г/м^3 . При этом на некоторых участках аспирационных систем максимально разовые значения пыли могут достигать величины $M_{\text{мр}} = 20,0...45,0 \text{ г/с}$ [2, 11, 24]. Проведенный анализ показал, что в производстве, например, керамзитового гравия для обеспыливания пылегазовых потоков при высоких концентрациях пыли в системах аспирации применяются установки, имеющие две, три и больше ступеней очистки [2, 24]. Такие установки являются достаточно затратными, энергоемкими и сложными в эксплуатации.

Постановка задачи исследования. Было предложено осуществлять улавливание пыли из пылегазового потока в обеспыливающих системах аспирации инерционно-гравитационным способом и в барботированном слое воды. При этом осуществляется сепарация частиц пыли пылеуловителем, в котором фактически реализована двухступенчатая система очистки. Для увеличения суммарной эффективности аппарата последовательно установлены модифицированный прямоточный циклон и контактные цилиндрические камеры, диаметры которых существенно различаются [25]. В основу разработки новых пылеуловителей должны быть положены результаты экспериментального определения величин коэффициента проскока частиц пыли, других характеристик устройства в области аэродинамических режимов их работы. Как показывает практика, внедрение в действующее производство связано с необходимостью учета конкретных условий и особенностей технологического процесса. Это является существенной технической проблемой.

С целью решения сложной задачи снижения количества частиц мелких фракций пыли, проскакивающих через аппараты в системах обеспыливания, был выполнен значительный объем исследований. Результатом исследований, проведенных в Волгоградском государственном архитектурно-строительном университете (ВолгГАСУ), явилась разработка устройства, успешные промышленные испытания которого были проведены в системе обеспыливания выбросов аспирации печей обжига керамзита с незначительной степенью проскока частиц пыли [2, 24, 25].

Следует отметить целесообразность дальнейших исследований и разработки процессов и устройств, обусловливаемых техническим, экономическим и социально-экологическим аспектами. Снижение выбросов в атмосферу предприятиями положительно влияет на оценку стабильности экономического состояния и привлечение инвестиций для дальнейшего развития предприятий стройиндустрии. Как показывают многочисленные проводимые исследования, решение данной проблемы является одним из необходимых и важных условий роста объемов производства для ЮФО и Волгоградской области и создает условия устойчивого развития общества [26].

Описание исследования и результаты. Экспериментальные исследования проводились в промышленных условиях на стенде, схема которого показана на рис. 1. Основу установки составил аппарат предложенной конструкции [25] в полномасштабном (М 1:1) исполнении с сохранением геометрических размеров, соотношений и форм реального (промышленного) устройства.

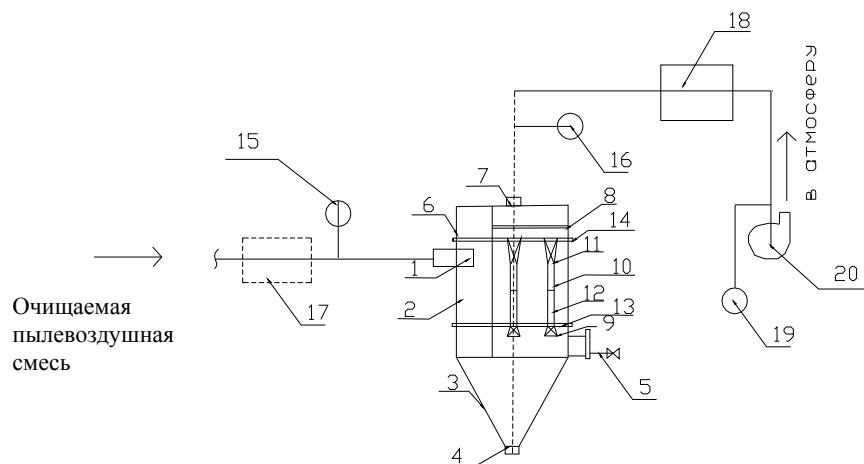


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — патрубок входа; 2 — технологический блок-модуль; 3 — блок-поддон с водой; 4 — патрубок слива воды; 5 — регулятор подачи и поддержания уровня жидкости; 6 — сепарационный блок; 7 — патрубок выхода очищенного потока газа; 8 — пластинчатый сепаратор; 9 — конфузур; 10 — контактные трубчатые камеры; 11 — диффузоры; 12 — насыпная керамзитовая загрузка; 13, 14 — горизонтальные перегородки; 15, 16 — измерительный комплекс для определения расхода и давления; 17, 18 — измерительный комплекс для определения концентрации; 19 — дистанционно управляемый шибер; 20 — вентилятор

Результаты проведенного исследования пылеуловителя предложенной конструкции подробно приведены в работах [2, 24]. Статистическая обработка результатов эксперимента с применением математического аппарата

и рекомендаций [27, 28] позволила получить функцию изменения коэффициента проскока керамзитовой пыли в устройстве мокрой очистки системы обеспыливания выбросов печей обжига керамзита в зависимости от общей высоты слоя жидкости $\bar{h}_{жк}$ в контактной камере и высоты контактной камеры, отнесенной к диаметру контактной камеры $\bar{h}_к$ регрессионного вида:

$$\zeta = 0,898(\bar{h}_{жк} - 5)^2 - 0,001(\bar{h}_к - 2,3)^2 - 2,1267. \quad (1)$$

Проведенные исследования показали возможность применения данного пылеулавливающего устройства в системах обеспыливания аспирации при более высоких концентрациях очищаемого пылегазового потока (до 1 г/м³). В ВолгГАСУ была разработана и исследована новая модификация вышеописанного пылеуловителя, снижающего проскок частиц мелких фракций пыли ζ в обеспыливающих устройствах систем аспирации. Заявка на патент модифицированного пылеуловителя получила предварительную положительную оценку Роспатента. В предложенной конструкции применено сочетание различных механизмов сепарации пыли, что представляется дальнейшим совершенствованием и развитием технических решений процесса мокрой очистки пылевоздушных потоков от пыли в системах аспирации производства стройматериалов. Снижение степени проскока пыли с обеспечением надежной работы достигается совокупностью элементов устройства, схема которого приведена на рис. 2. Пылеуловитель предназначен для очистки пылегазового потока от мелкодисперсных частиц в обеспыливающих системах выбросов аспирационных и пневмотранспортирующих систем. Данное устройство предлагается использовать в качестве одной из ступеней очистки выбросов в атмосферу в системах обеспыливания систем аспирации постов загрузки песка, известняка и глины на склад, мест перегрузки, конвейеров, течек и другого оборудования технологической линии производства цемента. В частности, было предложено применить данное устройство в системах обеспыливания систем аспирации постов загрузки песка (пыли с содержанием SiO₂ 20...70 %), смесительных бункеров и грануляторов на предприятиях по производству цемента.

Известно, что на процесс улавливания влияют многочисленные факторы. Из всех факторов к исследованию были приняты, исходя из предварительного изучения, следующие определяющие факторы:

$\bar{h}_{нс} = h_{нс_0} / (2d_k)$ — высота слоя сферической насадки в контактной камере $h_{нс_0}$, отсчитываемая от нижнего уровня сферической насадки, отнесенного к геометрическому размеру модуля сферической насадки, равного удвоенному диаметру контактной камеры $2d_k$, которая изменялась в интервале 1,0...2,0;

$\bar{h}_{жк} = \bar{h}_{жк_0} / h_k$ — уровень жидкости в конфузоре $\bar{h}_{жк}$, отсчитываемый от высоты расположения центра нижней сферической насадки в контактной камере $\bar{h}_{жк_0}$, отнесенный к высоте конфузора h_k , который варьировался в пределах $-0,5...0$;

$\bar{Re}_к = \bar{Re}_к / Re_к$ — значение критерия Рейнольдса в поперечном сечении контактной камеры $Re_к$, отнесенное к значению критерия Рейнольдса для начала образования квадратичного режима течения потока, $Re_к = 10\,000$.

Определяющие факторы, влияющие на степень проскока частиц пыли в новой модификации устройства мокрой очистки, имели вид, рекомендованный литературой [27, 28]:

$$x_1 = \frac{\bar{h}_{\text{нс}} - h_{\text{нс}0}}{\bar{h}_{\text{нс}}}; \quad x_2 = \frac{\bar{h}_{\text{жк}} - h_{\text{жк}0}}{\bar{h}_{\text{жк}}}; \quad x_3 = \frac{\bar{\text{Re}}_{\text{к}} - \text{Re}_{\text{к}0}}{\bar{\text{Re}}_{\text{к}}}. \quad (2)$$

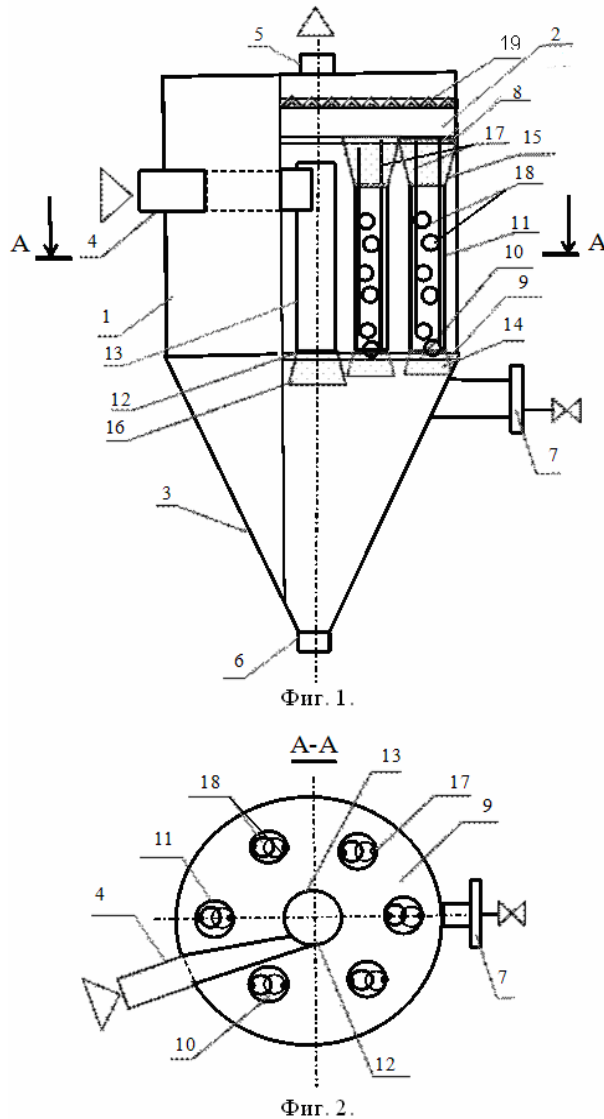


Рис. 2. Схема устройства для улавливания частиц пыли из пылегазового потока системы обеспыливания аспирации выбросов в атмосферу: 1 — технологический блок; 2 — сепарационный блок; 3 — блок-поддон; 4 — тангенциальный патрубок входа; 5 — выходной патрубок; 6 — патрубок слива жидкого шлама; 7 — устройство поддержания уровня жидкости в поддоне; 8, 9 — горизонтальные перегородки; 10 — отверстия в перегородке для подсоединения контактных камер; 11 — контактные камеры; 12 — отверстие в перегородке для подсоединения цилиндрической трубы; 13 — цилиндрическая труба; 14, 15 — диффузоры; 16 — конфузор; 17 — стойка; 18 — сферические насадки; 19 — пластинчатый сепаратор

Экспериментальные исследования проводились в промышленных условиях (см. рис. 1) с использованием в качестве пылеуловителя устройства новой модификации (рис. 2). Основу установки составил аппарат предложенной конструкции в полномасштабном (М 1:1) исполнении с сохранением геометрических размеров, соотношений и форм реального (промышленного) устройства (см. рис. 1). Опытно-промышленное устройство имело диаметр 300 мм при общей высоте установки около 2,5 м. Пылеуловитель предложенной конструкции был выполнен в полном масштабе (М 1:1) с сохранением всех характерных геометрических размеров ($D_{\text{пу}}$, d_k , h_k), соотношений и форм лабораторной установки. Контактные камеры имели диаметр 80 мм. В качестве рабочей жидкости в устройстве использовалась вода.

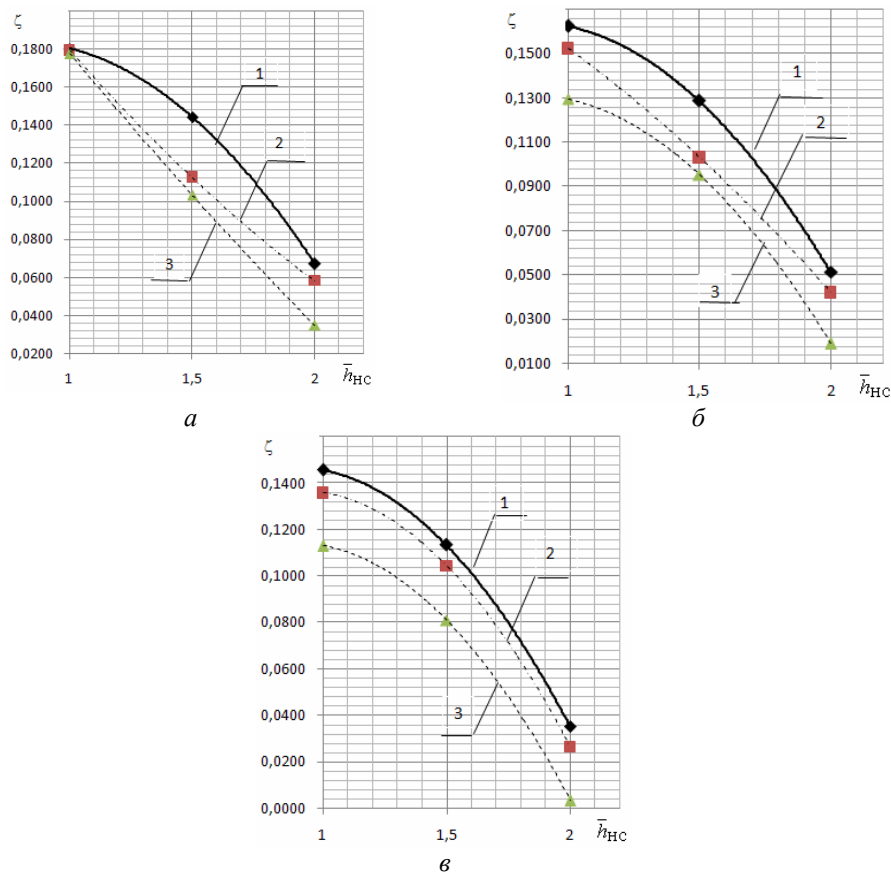


Рис. 3. Изменение степени проскока пыли ζ : а — при уровне жидкости в конфузоре $\bar{h}_{\text{жк}} = -0.5$, в зависимости от высоты слоя сферической насадки в контактной камере $\bar{h}_{\text{нс}}$ (величина изменялась в интервале 1...2,0) и значения критерия Рейнольдса $\overline{Re}_k$: 1 — $\overline{Re}_k = 0.69565$; 2 — $\overline{Re}_k = 3.13043$; 3 — $\overline{Re}_k = 5.56522$; б — $\bar{h}_{\text{жк}} = -0.25$, в зависимости от высоты слоя сферической насадки в контактной камере $\bar{h}_{\text{нс}}$ (величина изменялась в интервале 1...2,0) и значения критерия Рейнольдса $\overline{Re}_k$: 1 — $\overline{Re}_k = 3.13043$; 2 — $\overline{Re}_k = 3.13043$; 3 — $\overline{Re}_k = 5.56522$; в — при $\bar{h}_{\text{жк}} = 0$, в зависимости от высоты слоя сферической насадки в контактной камере $\bar{h}_{\text{нс}}$ (величина изменялась в интервале 1...2,0) и значения критерия Рейнольдса $\overline{Re}_k$: 1 — $\overline{Re}_k = 3.13043$; 2 — $\overline{Re}_k = 3.13043$; 3 — $\overline{Re}_k = 5.56522$

На рис. 3 представлены результаты исследования опытно-промышленной установки, описывающие изменение степени проскока пыли в аппарате в исследованной области режимов его работы.

При проведении испытаний пылеуловителя использовался стандартный модельный материал — пыль кварцевого песка. Математическая обработка результатов эксперимента с применением рекомендаций [27, 28] позволила получить зависимость изменения степени проскока пыли в устройстве от уровня жидкости в конфузоре $\bar{h}_{жк}$, относительной высоты слоя сферической насадки в контактной камере $\bar{h}_{нс}$ и относительного значения критерия Рейнольдса в поперечном сечении контактной камеры $\overline{Re}_к$ в виде регрессионного соотношения

$$\zeta = 0,0029(\bar{h}_{жк} - 10,72)^2 - 0,0852(\bar{h}_{нс} - 0,824)^2 - 0,0011(\overline{Re}_к^2 - 3) - 0,1850. \quad (2)$$

В качестве функций отклика были приняты степени проскока пыли в пылеуловителе и приведенный коэффициент местного сопротивления аппарата ξ , характеризующий аэродинамическое сопротивление устройства в рабочем режиме.

На рис. 4 представлена зависимость приведенного коэффициента местного сопротивления ξ устройства при максимальном уровне заполнения конфузов водой $\bar{h}_{жк} = 0$ от относительной среднерасходовой скорости очищенного газового потока $v_{ср}$, отнесенной к 1 м/с. Данное значение среднерасходовой скорости газового потока соответствует величине скорости гидродинамического режима развитого барботирования.

На рис. 5 приведена зависимость потерь давления ΔP_a , Па, в аппарате от относительной среднерасходовой скорости очищенного газового потока $v_{ср}$, отнесенной к 1 м/с при максимальном уровне заполнения конфузов водой $\bar{h}_{жк} = 0$.

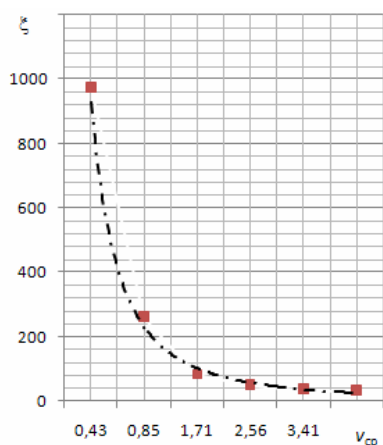


Рис. 4. Изменение приведенного коэффициента местного сопротивления ξ в зависимости от среднерасходовой скорости газового потока $v_{ср}$, отнесенной к 1 м/с при уровне жидкости в конфузоре $\bar{h}_{жк} = 0$

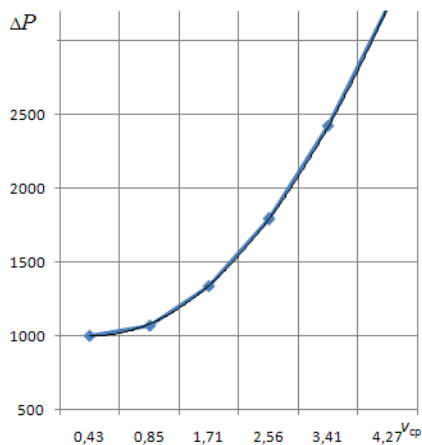


Рис. 5. График зависимости изменения потерь давления ΔP_a , Па, в аппарате от относительной среднерасходовой скорости очищенного газового потока $v_{ср}$

Экспериментально установлено, что минимальное значение степени проскока при улавливании пыли в устройстве достигается при значении критерия Рейнольдса $\overline{Re}_k = 5,56522$ ($v_{cp} = 4,27$), максимальном уровне (высоте) жидкости в конфузоре $\bar{h}_{жк} = 0$ и высоте слоя сферической насадки в контактной камере $\bar{h}_{нс} = 2,0$. Потери давления в аппарате ΔP_a при этом максимальны и достигают около 3250 Па. При уменьшении уровня (высоты) жидкости в конфузоре и высоте слоя сферической насадки степень проскока частиц пыли в устройстве увеличивается, достигая максимального значения при значении критерия Рейнольдса $\overline{Re}_k = 0,69565$ ($v_{cp} = 0,43$). Потери давления в аппарате ΔP_a при этом минимальны и составляют около 1000 Па.

При проведении промышленных испытаний на пыли кварцевого песка со среднегеометрическим диаметром $\delta_{50} = 4,0$ мкм статистическая обработка результатов эксперимента позволила получить зависимость изменения степени проскока пыли в устройстве от уровня жидкости в конфузоре $\bar{h}_{жк}$, высоты слоя сферической насадки в контактной камере $\bar{h}_{нс}$ и относительного значения критерия Рейнольдса в поперечном сечении контактной камеры $\overline{Re}_k$ регрессионного вида:

$$\zeta = 0,0035(\bar{h}_{жк} - 10,575)^2 - 0,0925(\bar{h}_{нс} - 0,702)^2 - 0,0009(\overline{Re}_k - 9)^2 - 0,1630. \quad (4)$$

Выводы:

1. Совершенствование систем очистки выбросов в промышленности и стройиндустрии может быть реализовано на основе применения устройства предложенных конструкций. В исследованном пылеуловителе сочетаются высокоэффективный инерционно-гравитационный механизм сепарации основной массы пыли и последующая сепарация ее редуцированных концентраций барботирующим слоем воды. Основным результатом исследования стало определение принципиальной возможности пылеулавливания в устройстве и области аэродинамических режимных параметров работы. При этом на экспериментальной установке получены данные по величине проскока пыли песка.

2. Анализ графиков, изображенных на рис. 3, показал следующее: приемлемые значения проскока пыли с практической точки зрения наблюдались при улавливании пыли в устройстве в диапазоне от степени проскока $\zeta = 0,0596$ при значении критерия Рейнольдса $\overline{Re}_k = 3,13043$ ($v_{cp} = 3,41$), уровне (высоте) жидкости в конфузоре $\bar{h}_{жк} = -0,25$ и высоте насадки $\bar{h}_{нс} = 2$. При максимальных значениях исследованного аэродинамического диапазона работы устройства при значении критерия Рейнольдса $\overline{Re}_k = 5,56522$, уровне (высоте) жидкости в конфузоре $\bar{h}_{жк} = 0$ и $\bar{h}_{нс} = 2$ степень проскока имела минимальное значение и составила $\zeta = 0,0613$. Потери давления в аппарате ΔP_a при этом имеют приемлемые величины и достигают около 2000...2200 Па. При этом минимальные значения величины степени проскока пыли в аэродинамических режимах, в области которых установлена наибольшая надежность работы устройства, при значении критерия Рейнольдса $\overline{Re}_k = 3,13043$, уровне (высоте) жидкости в конфузоре $\bar{h}_{жк} = -0,25$ и $\bar{h}_{нс} = 2$

составили $\zeta = 0,0411$. Аэродинамическое сопротивление установки ΔP_a имело приемлемую для практики величину и составляло в рабочем режиме около 1600...1800 Па. При этом масштабирование установки с увеличением производительности устройства возможно увеличением числа ячеек из расчета нагрузки по очищаемому пылегазовому потоку 150...180 м³/ч на одну контактную камеру. Данное устройство может быть использовано в обеспыливающих системах аспирации с начальными концентрациями пыли в очищаемом пылегазовом потоке до 1 г/м³.

При использовании исследованных конструкций пылеуловителей мокрой очистки установлено существенное снижение степени проскока пыли керамзита и песка в системах обеспыливания аспирационных систем стройиндустрии. При этом достигается существенное уменьшение (до 30 %) максимально разовых и валовых выбросов в обеспыливающих системах аспирации на предприятиях по производству керамзита и цемента. Результат проведенного исследования на установках в промышленных условиях дает основание рекомендовать применение данного перспективного метода для решения актуальной проблемы повышения экологической безопасности стройиндустрии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горин В. М. Применение керамзитобетона в строительстве — путь к энерго- и ресурсоэффективности, безопасности зданий и сооружений // Строительные материалы. 2010. № 8(668). С. 8—11.
2. Азаров В. Н., Кошкарев С. А. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 2. С. 18—32.
3. Онацкий С. П. Производство керамзита. М. : Стройиздат, 1987. 405 с.
4. Борщевский А. А. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий. М. : Высшая школа, 326 с.
5. Баширов Х. З. Повышение эксплуатационной надежности производственных зданий и сооружений на транспорте. М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп., 2010. 341 с.
6. Дуда В. Цемент. М. : Стройиздат, 1981. 463 с.
7. Лоскутов Ю. А., Максимов В. И., Веселовский В. В. Механическое оборудование для производства вяжущих строительных материалов. М. : Стройиздат, 1986. 278 с.
8. Комар А. Г. Строительные материалы и изделия. М. : Высшая школа, 1988. 527 с.
9. Особенности аспирации технологического оборудования предприятий по производству цемента / В. Н. Азаров и др. // Вестник Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 31(50). Ч. 2. С. 499—502.
10. Азаров В. Н., Кошкарев С. А., Соломахина Л. Я. К экспериментальной оценке эффективности аппарата мокрой очистки в системах обеспыливания выбросов в атмосферу от печей обжига керамзита // Инженерный вестник Дона. 2014. № 4—1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2572 (дата обращения : 01.10.2015).
11. Азаров В. Н., Кошкарев С. А., Николенко М. А. К определению фактических размеров частиц пыли выбросов стройиндустрии и строительства // Инженерный вестник Дона. 2015. № 1—2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2858 (дата обращения : 01.10.2015).
12. Сергина Н. М., Азаров Д. В., Гладков, Е. В. Системы инерционного пылеулавливания в промышленности строительных материалов // Стройматериалы. 2013. № 2. С. 86—88.
13. Strelets K. I., Kitain M. B., Petrochenko M. V. Welding spark parameters determination for cyclone removal calculation // Advanced materials research. 2014. Т. 941. Pp. 2098—2103.
14. Vatin N., Strelets K. I., Kharkov N. Gas dynamics in a counter flow cyclone with conical nozzles on the exhaust pipe // Applied mechanics and materials. 2014. Т. 635. Pp. 17—21.
15. Strelets K., Petrochenko M., Girgidov A. Energy performance of particle settling in cyclones // Applied mechanics and materials. 2015. Т. 725. Pp. 1363—1371.

16. Experimental study of secondary swirling flow influence on flows structure at separation chamber inlet of dust collector with counter swirling flows / V. N. Azarov, D. V. Lukanin, D. P. Borovkov, A. M. Redhwan // *International review of mechanical engineering*. 2014. Vol. 8. № 5. Pp. 851—856.
17. Özgen S. Modeling and optimization of hydrocyclone processing of low grade bentonites // *Applied Clay Science*. 2009. V. 46. № 3. Pp. 305—313.
18. Marthinussen S. A. Removal of particles from highly viscous liquids with hydrocyclones // *Chemical Engineering Science*. 2014. V. 108. Pp. 169—175.
19. Zhu G., Liow J. L. Experimental study of particle separation and the fishhook effect in a mini-hydrocyclone // *Chemical Engineering Science*. 2014. V. 111. Pp. 94—105.
20. Vieira L. G. M., Barrozo M. A. S. Effect of vortex finder diameter on the performance of a novel hydrocyclone separator // *Minerals Engineering*. 2014. V. 57. Pp. 50—56.
21. Elsayed K. Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using Co-Kriging // *Powder Technology*. 2015. V. 269. Pp. 409—424.
22. Устройство для определения дисперсного состава пыли : пат. № 135806 Рос. Федерация : U1 МПК G01N 15/00 / В. Н. Азаров, С. А. Кошкарёв и др. — № 2013121082/28 ; заявл. 07.05.2013 ; зарег. 20.12.2013, Бюл. № 35.
23. Азаров В. Н., Богомолов А. Н. О дисперсном составе пыли в системах аспирации и пневмоуборки // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. 2012. № 25. С. 218—223.
24. Маринин Н. А. Исследование дисперсного состава пыли в инженерно-экологических системах и выбросах в атмосферу предприятий стройиндустрии : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2014. 20 с.
25. Устройство для очистки газов : пат. № 139122 Рос. Федерация : МКИ В 01 Д 47/02 / С. А. Кошкарёв, В. Н. Азаров, Т. А. Кисленко и др. — № 2013138200/05 ; заявл. 15.08.2013 ; зарег. 10.04.2014, Бюл. № 10.
26. Evaluating of sustainability of Volgograd / N. Sadovnikova, D. Parigyn, B. Sanzhapov, E. Gnednikova // *WIT Transaction on Ecology and the Environment*. 2013. Vol. 1. Pp. 279—290.
27. Ермаков С. М. Математическая теория оптимального эксперимента. М. : Наука, 2007. 320 с.
28. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента. М. : Мир, 1981. 520 с.
1. Gorin V. M. Primenenie keramzitobetona v stroitel'stve — put' k energo- i resursoeffektivnosti, bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy // *Stroitel'nye materialy*. 2010. № 8(668). S. 8—11.
2. Azarov V. N., Koshkarev S. A. Otsenka effektivnosti apparata mokroi ochistki obespylivaniya vybrosov pechei obzhiga keramzita // *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2015. № 2. С. 18—32.
3. Onatskii S. P. Proizvodstvo keramzita. M. : Stroizdat, 1987. 405 s.
4. Borshchevskii A. A. Mekhanicheskoe oborudovanie dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov i izdelii. M. : Vysshaya shkola, 326 s.
5. Bashirov Kh. Z. Povyshenie ekspluatatsionnoi nadezhnosti proizvodstvennykh zdaniy i sooruzheniy na transporte. M. : Ucheb.-metod. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transp., 2010. 341 s.
6. Duda V. Tsement. M. : Stroizdat, 1981. 463 s.
7. Loskutov Yu. A., Maksimov V. I., Veselovskii V. V. Mekhanicheskoe oborudovanie dlya proizvodstva vyazhushchikh stroitel'nykh materialov. M. : Stroizdat, 1986. 278 s.
8. Komar A. G. Stroitel'nye materialy i izdeliya. M. : Vysshaya shkola, 1988. 527 s.
9. Osobennosti aspiratsii tekhnologicheskogo oborudovaniya predpriyatii po proizvodstvu tsementa / V. N. Azarov i dr. // *Vestnik Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2013. № 31(50). Ch. 2. S. 499—502.
10. Azarov V. N., Koshkarev S. A., Solomakhina L. Ya. K eksperimental'noi otsenke effektivnosti apparata mokroi ochistki v sistemakh obespylivaniya vybrosov v atmosferu ot pechei obzhiga keramzita // *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2014. № 4—1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2572 (data obrashcheniya : 01.10.2015).
11. Azarov V. N., Koshkarev S. A., Nikolenko M. A. K opredeleniyu fakticheskikh razmerov chastits pyli vybrosov stroiindustrii i stroitel'stva // *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2015. № 1—2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2858 (data obrashcheniya : 01.10.2015).
12. Sergina N. M., Azarov D. V., Gladkov, E. V. Sistemy inertsionnogo pyleulavlivaniya v promyshlennosti stroitel'nykh materialov // *Stroimaterialy*. 2013. № 2. S. 86—88.

13. *Strelets K. I., Kitain M. B., Petrochenko M. V.* Welding spark parameters determination for cyclone removal calculation // *Advanced materials research*. 2014. T. 941. Pr. 2098—2103.
14. *Vatin N., Strelets K. I., Kharkov N.* Gas dynamics in a counter flow cyclone with conical nozzles on the exhaust pipe // *Applied mechanics and materials*. 2014. T. 635. Pr. 17—21.
15. *Strelets K., Petrochenko M., Girgidov A.* Energy performance of particle settling in cyclones // *Applied mechanics and materials*. 2015. T. 725. Pp. 1363—1371.
16. Experimental study of secondary swirling flow influence on flows structure at separation chamber inlet of dust collector with counter swirling flows / V. N. Azarov, D. V. Lukanin, D. P. Borovkov, A. M. Redhwan // *International review of mechanical engineering*. 2014. Vol. 8. № 5. Pp. 851—856.
17. *Özgen S.* Modeling and optimization of hydrocyclone processing of low grade bentonites // *Applied Clay Science*. 2009. V. 46. № 3. Pp. 305—313.
18. *Marthinussen S. A.* Removal of particles from highly viscous liquids with hydrocyclones // *Chemical Engineering Science*. 2014. V. 108. Pp. 169—175.
19. *Zhu G., Liow J. L.* Experimental study of particle separation and the fishhook effect in a mini-hydrocyclone // *Chemical Engineering Science*. 2014. V. 111. Pp. 94—105.
20. *Vieira L. G. M., Barrozo M. A. S.* Effect of vortex finder diameter on the performance of a novel hydrocyclone separator // *Minerals Engineering*. 2014. V. 57. Pp. 50—56.
21. *Elsayed K.* Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using Co-Kriging // *Powder Technology*. 2015. V. 269. Pp. 409—424.
22. Устройство для определения дисперсного состава пыли : пат. № 135806 Рос. Федерация : U1 MPK G01N 15/00 /, V. N. Azarov, S. A. Koshkarev i dr. — № 2013121082/28 ; заявл. 07.05.2013 ; зарег. 20.12.2013, Byul. № 35
23. *Azarov V. N., Bogomolov A. N.* O dispersnom sostave pyli v sistemakh aspiratsii i pnevmotransporta // *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo uni-versiteta*. 2012. № 25. S. 218—223.
24. *Marinin N. A.* Issledovanie dispersnogo sostava pyli v inzhenerno-ekologicheskikh sistemakh i vybrosakh v atmosferu predpriyatii stroiindustrii : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Volgograd, 2014. 20 s.
25. Устройство для очистки газов : пат. № 139122 Рос. Федерация : MKI V 01 D 47/02 / S. A. Koshkarev, V. N. Azarov, T. A. Kislenko i dr. — № 2013138200/05 ; заявл. 15.08.2013 ; зарег. 10.04.2014, Byul. № 10.
26. Evaluating of sustainability of Volgograd / N. Sadovnikova, D. Parigyn, B. Sanzhapov, E. Gnednikova // *WIT Transaction on Ecology and the Environment*. 2013. Vol. 1. Pp. 279—290.
27. *Ermakov S. M.* Matematicheskaya teoriya optimal'nogo eksperimenta. M. : Nauka, 2007. 320 s.
28. *Dzhonson N.* Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke. Metody planirovaniya eksperimenta. M. : Mir, 1981. 520 s.

© Кошкарёв С. А., 2015

Поступила в редакцию
в октябре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Кошкарёв С. А. Повышение экологической безопасности при снижении выбросов систем обеспыливания в стройиндустрии // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2015. Вып. 4(40). Ст. 5. Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>

For citation:

Koshkarev S. A. [Improvement of environmental safety while reducing dust emissions by decreasing dusting schemes in construction industry]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2015, no. 4(40), paper 5. (In Russ.). Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>