

doi: 10.5862/MCE.54.3

Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита

*К.т.н., доцент С.А. Кошкарев;
д.т.н., заведующий кафедрой В.Н. Азаров,
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

Аннотация. В статье рассмотрен перспективный способ сокращения выбросов пыли в атмосферу в производстве керамзита высокоэффективным аппаратом мокрой очистки с комбинированной схемой пылеулавливания в обеспыливающих системах аспирации.

Приведена краткая характеристика технологических процессов, аппаратов и связанных с ними основных источников выделений и выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при производстве керамзита. В работе представлены данные промышленного обследования репрезентативной выборки систем аспирации и применяемых в них пылеулавливающих устройств ряда предприятий, производящих гранулированный керамзит. Приведены основные результаты дисперсионного анализа керамзитовой пыли, выделяющейся в печах обжига. Обоснована целесообразность разработки новых более эффективных конструкций пылеуловителей для обеспыливающих систем аспирации.

Проведены разработка и испытания пылеуловителя мокрой очистки, обеспечивающего значительное снижение коэффициента проскока улавливаемой пыли керамзита в атмосферу. Выполнена экспериментальная оценка степени проскока частиц пыли в предложенном пылеуловителе. Получена зависимость коэффициента проскока частиц пыли в пылеуловителе регрессионного вида в зависимости от некоторых параметров.

Ключевые слова: пылеулавливание; сепарации; пыль; керамзит; дисперсионный анализ; выбросы; атмосфера; системы обеспыливания; пылеуловитель мокрой очистки

Введение

Строительство энерго- и ресурсоэффективных безопасных зданий и сооружений, в том числе в рамках национального проекта «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» [1], предполагает использование тепло- и энергосберегающих строительных материалов. Одними из таких эффективных строительных материалов являются теплоизоляционные и конструкционные легкие бетоны с использованием керамзита, которые широко применяются в жилищном строительстве, в том числе экономкласса. Керамзит, конструкционные легкие бетоны, керамзитобетоны были и остаются многофункциональными, эффективными и в то же время относительно недорогими материалами, что позволяет применять их при строительстве различных типов зданий и сооружений. В зависимости от свойств исходного сырья и технологических приемов могут быть получены керамзитовый гравий, щебень или песок с различными показателями плотности и прочности, что обуславливает широкий спектр применения – от несущих железобетонных конструкций до облегченных стеновых панелей с низкой теплопроводностью [2].

Важнейшим фактором успешного развития индустриального крупнопанельного домостроения в нашей стране, обеспечивающего выполнение государственных постановлений в области строительства [1], стало развитие производства керамзита и эффективных теплоизоляционных, конструкционно-теплоизоляционных и конструкционных легких бетонов [2].

Производство искусственных пористых заполнителей (керамзитового гравия и песка) для легких бетонов является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей строительной индустрии. Из основного объема производства керамзита в стране наибольший приходится на Центральный, Приволжский и Южный федеральные округа, где сосредоточены основные запасы сырья [3]. Значительная часть промышленного производства керамзита в ЮФО расположена в Волгограде и Волгоградской области.

Особенность производства пористых заполнителей (в частности, керамзитового гравия, песка) состоит в последовательном осуществлении ряда сложных в экологическом отношении операций переработки сыпучих материалов, включая их термическую обработку, перегрузку сырьевых сыпучих компонентов и готовой продукции – керамзитового гравия и песка. В ходе данных технологических операций выделяется значительное количество вредных ингредиентов, Кошкарев С.А., Азаров В.Н. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита

полидисперсной пыли. Керамзитовая пыль удаляется от источников выделений системами местной вытяжной вентиляции и составляет наибольшую массу в выбросах в атмосферу, которые производят предприятия данной отрасли. Для снижения негативного техногенного влияния на атмосферный воздух и окружающую среду такие предприятия оснащаются системами местной вытяжной вентиляции с пылеулавливающим оборудованием. В связи с возрастающим объемом выпускаемой предприятиями стройиндустрии продукции для повышения экологической безопасности предприятий по производству керамзита и, следовательно, уменьшения возрастающего негативного техногенного воздействия данной отрасли на атмосферный воздух требуется совершенствование и реконструкция существующих пылеулавливающих установок. Следует отметить, что снижение выбросов в атмосферу позитивно влияет на экологическую ситуацию, экономику региона, способствует устойчивому развитию общества. [4].

Обзор литературы

Анализ многочисленных литературных данных показывает, что в настоящее время проводится разработка различного рода новых пылеулавливающих устройств. Существующие проблемы, возникающие при эксплуатации аппаратов по очистке пылегазовых потоков от пыли, в том числе в стройиндустрии, показывают актуальность проводимых исследований и разработок по их совершенствованию. При этом становятся все более востребованными разработка и внедрение новых, более совершенных устройств по очистке газов от пыли. Это особенно актуально, если учесть, что предприятия отрасли расположены на высокоурбанизированных территориях, в непосредственной близости от жилой застройки.

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 [5–7].

При производстве строительного керамзита основной стадией является обжиг глиняных гранул в оптимальном режиме. Для эффективного вспучивания глиняной гранулы необходимо, чтобы переход глины в пиропластическое состояние по времени совпал с периодом активного газовыделения. В обычных условиях при обжиге пиропластическое размягчение глин происходит при более высоких температурах (выше 11000 °С), чем газовыделение (температура диссоциации карбоната магния – до 6000 °С, карбоната кальция – до 9500 °С, дегидратации глинистых минералов – до 8000 °С, реакции восстановления оксидов железа – до 9000 °С). Поэтому при обжиге сырцовых гранул необходим быстрый подъем температуры [5–7].

В ходе этих операций образуется значительное количество вредных выделений (в первую очередь, полидисперсной пыли), локализация и отвод которых от источников выделений осуществляется системами местной вытяжной вентиляции, оснащенными установками пылеулавливания. В большинстве данных установок пылеулавливания наибольшее распространение получил инерционно-гравитационный механизм отделения пыли от очищаемого газопылевого потока. Проведенный анализ показал, что в производстве керамзитового гравия для обеспыливания применяются установки, имеющие две, три и больше ступеней очистки. Причем в качестве первой ступени, как правило, устанавливаются циклоны типа ЦН, СКЦН, ЛИОТ, в качестве последующих ступеней – рукавные фильтры и электрофильтры [8]. На практике вытяжные вентиляционные системы также оборудованы многоступенчатыми системами пылеочистки [8–10]. В таких многоступенчатых системах применяются аппараты сухой (преимущественно инерционной) и мокрой очистки. Однако осуществляемые в них процессы из-за многоступенчатости очистных циклов, последовательной установки нескольких аппаратов и, следовательно, значительного аэродинамического сопротивления, отличаются высокой энергоемкостью. К тому же такие установки являются достаточно дорогими и сложными в эксплуатации [10, 11].

В работе [12] для обоснования выбора наиболее эффективного принципа действия при последующей разработке нового типа пылеуловителя приведены данные анализа и практической оценки эффективности центробежно-инерционных пылеуловителей с жалюзийным отводом воздуха, различающихся по принципам действия и конструктивному исполнению, при очистке воздушных промышленных потоков. Изложенная методика расчетов эффективности новых и усовершенствованных пылеулавливающих систем (центробежно-инерционных с жалюзийным отводом воздуха, мокрых и магнитных) на основе результатов экспериментальных исследований

позволила разработать, создать и успешно ввести в промышленную эксплуатацию три конструкции центробежно-инерционных пылеуловителей с жалюзийным отводом воздуха [12].

Другим перспективным направлением является разработка многоступенчатых очистных систем с последовательной установкой в них центробежно-инерционных пылеуловителей новых конструкций, имеющих высокую эффективность пылеулавливания даже при пониженном аэродинамическом сопротивлении. В работе [13] указаны пути снижения пыли в атмосферу при использовании устройств центробежно-инерционного типа (аппаратов на встречно закрученных потоках (ВЗП), циклонов) в системах обеспыливания, применяющихся в производстве строительных материалов. В статье [14] представлено описание схем систем пылеулавливания с последовательной установкой трех аппаратов ВЗП для очистки пылегазового потока с высокими значениями концентраций пыли. Разработанная и рассмотренная в работе установка с частичной рециркуляцией способствует лучшему отделению частиц пыли, особенно мелкодисперсных, не только в пылеуловителе первой ступени, но и в аппарате второй ступени очистки [14].

Кроме разработки новых конструкций центробежно-инерционных пылеуловителей и многоступенчатых очистных систем с последовательной их установкой (ВЗП, циклонов и т. п.), ведутся работы по совершенствованию и внедрению в промышленность других типов пылеулавливающих устройств, в том числе и рукавных фильтров. Так, в работе [15] приведены основные результаты реконструкции аспирационной установки и внедрения нового пылеулавливающего оборудования – рукавных фильтров на предприятии по переработке щебня. Это, в свою очередь, позволило достичь нормативных значений выбросов и обеспечить повышение экологической безопасности производства. Другой тип пылеуловителей исследован в статье [16]. В НИИ «Охраны труда» на основе результатов исследований разработаны два варианта комбинированных мокрых пылеуловителей, в которых в качестве одной из ступеней очистки воздуха использованы насадки из зернистого материала (шаровые насадки). Установлено, что эффективность очистки исследованных устройств на промышленной пыли со средним по массе размером частиц 20 мкм достигает 99,8 % при приемлемой величине гидравлического сопротивления – 2500 Па [16].

Появление новых конструкций пылеулавливающих устройств требует совершенствования методик их расчетов. Так, например, в работе [17] проведено экспериментальное обоснование метода определения некоторых постоянных параметров, присущих инерционным пылеуловителям, для формирования банка данных универсального метода расчета (УМР) инерционных пылеуловителей с учетом параметров нормального логарифмического распределения частиц пыли по размерам на входе аппаратов. Показано хорошее согласование данных, полученных этим методом, по сравнению с уже известными существующими данными более ранних работ.

Работы [18–27] посвящены также фундаментальному направлению исследований, связанному с изучением и моделированием течений в инерционных пылеуловителях. В статье [18] проведено численное моделирование трехмерного поля скорости в циклоне и представлены результаты численного эксперимента. В статье [19] предложена методика определения эффективности улавливания искр в противоточном циклоне при использовании модели турбулентной диффузии, измерения гидравлической крупности частиц, определяемой экспериментальными измерениями скорости седиментации частиц с использованием компьютерного моделирования траекторий, и представлены результаты исследований. В работе приведены результаты изучения перепада давления и расхода в области стандартных моделей газа циклонов с использованием специальных модельных представлений.

В работе [20] отмечено, что на эффективность очистки воздуха оказывают существенное влияние многочисленные факторы. Это имеет большое значение при выборе системы очистки воздуха во многих отраслях промышленности, обеспечивающих эффективную организацию воздухообмена. Особенно важно уделять внимание производствам, в технологическом процессе которых выделяются, обращаются пыли или производятся горючие и взрывоопасные вещества в пылевидном состоянии и где использовать воду для предотвращения возгорания и тушения пожаров не представляется возможным. В работе исследован циклон с использованием обратного потока воздуха для предварительной очистки газа от искр расплавленного металла, попадание которых на фильтрующие элементы недопустимо для искрогасителей. Данное устройство может стать одним из эффективных способов предотвращения возникновения пожаров и взрывов. Тем самым повышается пожаробезопасность предприятия. Это особенно актуально, если циклон с искрогасителем использовать по каким-то причинам неприемлемо. В статье получены результаты

по эффективности улавливания данного циклона. При этом экспериментально доказана эффективность использования циклона при улавливании искр при сварке металлов.

В статье [21] отмечено, что в последнее время противоточные циклоны продолжают получать все большее распространение и широко применяются в различных отраслях промышленности. В данной статье рассмотрено влияние конической насадки на выхлопной трубе противоточного циклона классической конструкции на газодинамическую картину в циклоне. Результаты сопоставлены с расчетом для случая установки конического сопла на выхлопной трубе. Расчеты проводились с использованием пакета программного обеспечения CosmosFloWorks (численного моделирования динамики газового потока CDF), который использует метод конечных объемов. Движение жидкости моделируется при использовании уравнений Навье – Стокса и осредненных значений числа Рейнольдса. Для обеспечения замкнутости системы в уравнениях переноса и потери (диссипации) кинетической энергии используется $k-\epsilon$ модель турбулентности. Приведены также экспериментально полученные данные по эффективности пылеулавливания исследованного в работе циклона, имеющие приемлемую сходимость с результатами расчета по модели.

В статье [22] приведены результаты исследований влияния формы циклона и пылесборника на пылегазовый поток в аппарате инерционного типа (циклоне) на эффективность работы и производительность устройств. Также приведены результаты экспериментального исследования и численного моделирования изменения и падения аэродинамического давления – одного из важных параметров для характеристики циклонных сепараторов. Применено численное моделирование гидродинамики (CFD) с использованием напряжения Рейнольдса (RSM). Концепция генерации энтропии, используемая в данной работе, позволила установить области значительного влияния трения в завихрениях в нижней части конической области и на поверхности раздела внешнего и основного потоков газа в циклоне.

В статье [23] рассматриваются модели, разработанные для описания поля потока обратного течения внутри циклонов. В первой части рассмотрены традиционные математические модели и приведено их обоснование в общей форме, в том числе выражения для определения тангенциальной скорости и перепада давления. Рассмотрены также зависимости для непосредственного прогнозирования эффективности улавливания. Отмечено, что, хотя проанализированные методы имели значительный успех, необходимо развивать модельные представления для циклонов. В работе выдвинута гипотеза и сформулировано понятие о так называемой «естественной» длине циклона. Выполненные исследования привели к нестабильному режиму работы и образованию вторичных потоков в циклоне. Применение численных методов для описания гидродинамики (CFD) в этом случае весьма затруднено ввиду разнообразия самой природы и структуры течения потоков. В статье проведен обзор работ, посвященных моделированию с использованием численных методов для описания гидродинамики (CFD) одно- и двухфазных потоков, стационарных и нестационарных течений в циклонах, направленных на решение поставленных задач совершенствования пылеуловителей. Отмечены существующие ограничения в применении данных методов и выделены самые современные и перспективные направления в этой области.

В работе [24] представлены результаты численного исследования течения пылегазового потока в одном из распространенных типов циклона. Использование в исследовании модели напряжений Рейнольдса позволило оценить параметры турбулентности течения. Полученные в результате расчетов с использованием стохастической модели Лагранжа поля давления и пылегазового потока сравнивались с экспериментальными данными. Эффективность сепарации и траектории частиц, полученные расчетом при моделировании, имели приемлемую сходимость с результатами экспериментальных данных. Были выявлены некоторые факторы, влияющие на производительность циклона. Отмечено образование дипольной структуры потока в осевом сечении вблизи оси циклона. В исследовании установлено, что частицы, входящие в циклон в различных положениях, имеют различную эффективность улавливания в циклоне. Частицы размером, превышающим величину критического диаметра, задерживаются (оседают) на стенке конуса циклона, что является, по мнению авторов, одной из основных причин адгезии-осаждения на внутренней конической поверхности таких циклонов, используемых, например, в цементной промышленности.

Статья [25] посвящена исследованию индикатора тангенциальной скорости, или параметра крутки потока n , имеющего существенное влияние на поле течения и перепада давления в свободной вихревой зоне внутри циклонного сепаратора. В этой статье приведены значения данного индикатора-параметра n , получаемого расчетом распределения касательной скорости

Кошкарев С.А., Азаров В.Н. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита

внутри циклона методом численного моделирования с построением графика в вихревой зоне и использованием метода наименьших квадратов. Результаты эксперимента показали, что изменение скоростей потока во входном патрубке и радиальном направлении в вихревой зоне циклона не оказывают существенного влияния на значения n . В то же самое время увеличение диаметра циклона, диаметра трубы патрубка выхода очищенного газа и уменьшение отрезка выходной трубы внутри аппарата приводят к увеличению значений n .

В работе [26] проведено компьютерное моделирование с математическим описанием движения частиц пыли в закрученных потоках с использованием специальных программных средств. Представленные результаты исследований использовались для организации закрученного пылегазового потока в системах аспирации. Полученные данные были применены, в том числе, для расчета аэродинамических потерь давления в воздуховодах систем аспирации и пылеуловителях ВЗП и предполагаемой эффективности пылеулавливания в ВЗП с учетом фракционного состава частиц пыли.

Теоретическому обоснованию, разработке новых интенсивных центробежно-инерционных процессов очистки пылегазовых потоков и их аппаратного оформления посвящен целый ряд исследований, например, [27–28]. Целью диссертационной работы [27] является создание метода расчета технической эффективности пылеудаления в циклоне. Метод расчета позволяет учитывать влияние геометрических параметров циклона на его эффективность, влияние турбулентности потока газа на процесс удаления мелких частиц, обеспечивать учет характеристик пыли, в том числе их форму и плотность частицы. В работе предложена математическая модель осаждения частиц в циклоне, учитывающая влияние поля тангенциальной скорости и турбулентности на техническую эффективность циклона. Были обобщены численные решения дифференциальных уравнений, описывающих осаждение частиц пыли, и разработаны номограммы для расчета осаждения. На основании проведенного анализа трехмерного поля скорости внутри противоточного циклона было предложено рассчитывать такие устройства с использованием параметра гравитационной гидравлической крупности, как одной из основных характеристик улавливаемых частиц пыли. Данный подход может стать одним из перспективных методов для совершенствования конструкций и параметров циклонов применительно к конкретным условиям производства. При этом отмечено, что имеется хорошее совпадение экспериментальных и теоретических результатов исследования способов интенсификации пылеулавливания в прямоточных циклонах и инерционно-центробежных пылеуловителях на основе численных методов и компьютерного 3D-моделирования механики жидкости и газа.

Обычно влияние турбулентности вращающегося потока на движение частиц не рассматривается в существующих моделях. В работе [28] приведены результаты исследования оседания частиц в циклоне с использованием модели турбулентной диффузии. Для оценки закономерности оседания частиц при разработке и оптимизации циклонного устройства была использована математическая модель, которая учитывала воздействие турбулентности вращающегося потока на движение частиц.

В работе [29] выполнены фундаментальные исследования гидродинамики процессов с неоднородными структурами закрученных гетерогенных потоков в вихревых аппаратах. Предложены модели описания движения гетерогенных закрученных потоков (газ – жидкость – твердое тело) процессов сепарации пыли и методы расчета новых конструкций прямоточных центробежно-инерционных пылеуловителей и прямоточных циклонов.

Также продолжает оставаться популярным и востребованным направлением по разработке новых конструкций центробежно-инерционных устройств мокрой очистки газов (циклонов, скрубберов) с применением методов численного моделирования описания и расчета пылеулавливания, например, [30, 31]. Так, в статье [30] представлены результаты исследования численного решения уравнений Эйлера, описывающих гидродинамику течения потоков, в сочетании с дискретной фазовой моделью (DPM) для получения характеристик трехфазного потока (газ – жидкость – твердое тело) и оценки эффективности очистки очищаемого потока газа от пыли в скруббере мокрой очистки. При этом предлагаемый метод расчета, по мнению авторов, может обеспечить фундаментальную основу для оптимизации моделирования улавливания пыли и сероочистки в исследованной конструкции скруббера мокрой очистки.

В работе [31] была изучена сепарация аэрозоля из очищаемого потока устройством, в котором объединены прямоточный циклон и скруббер. Результаты проведенного исследования показали, что вихревой скруббер предложенной конструкции является перспективным устройством, которое при невысоких затратах на монтаж требует относительно незначительных

расходов на обслуживание и эксплуатацию. Авторами выполнен теоретический анализ разработанного вихревого циклона-скруббера. Экспериментально получена зависимость эффективности улавливания частиц при эксплуатации в проектом режиме с использованием теоретически определенного комплекса параметров. Такой подход, по мнению авторов, обеспечивает использование полученных принципов для оптимального проектирования и эффективной эксплуатации устройства. В результате исследования предложены пути создания возможных модификаций вихревых циклонов-скрубберов на основе использования полученного теоретически комплекса параметров.

В статье [32] были определены и представлены характеристики, функциональные зависимости эффективности улавливания частиц из жидкостей с высоким значением коэффициента вязкости и падения давления в гидроциклоне предложенной конструкции. Результаты исследования имеют высокую степень достоверности и могут служить в качестве ориентира для моделирования устройств подобного типа. Было выполнено численное моделирование (CFD) устройства, позволившее на основании описания схем движения потоков и падения давления в гидроциклоне определить интенсивности закрученного потока как функции вязкости жидкости. Модель, приведенная в работе, может быть ценным инструментом при оценке потенциала эффективности технологии очистки, разделения и улавливания частиц в гидроциклонах новых модификаций.

Гидроциклоны широко применяются в качестве технологического и природоохранного оборудования, например, в горнодобывающей промышленности. Можно отметить применение данных устройств для предварительного обезвоживания, концентрирования и классификации шламов. Так, например, авторами работы [33] был разработан и исследован гидроциклон новой конструкции. В этом устройстве конусная секция обычного гидроциклона была заменена конической фильтрующей стенкой. Данному устройству было дано название фильтрующего гидроциклона. В процессе работы такого гидроциклона, кроме нижнего и переливного (верхнего) отводов потоков продукта, образуется и другой поток жидкости – фильтрата. В результате фильтрации потока шлама через коническую пористую стенку устройства и выделяется фильтрат. В данной работе исследовался гидроциклон предложенной конструкции с применением численного моделирования (CFD) и экспериментальных измерений. Было изучено влияние на крутку потока диаметра фильтрующего гидроциклона. Результаты показали, что производительность процесса разделения была значительно улучшена с применением гидроциклона новой конструкции.

В зависимости от функций назначения сепаратора (как классификатора или концентратора) были получены также наиболее приемлемые значения диаметра гидроциклона. Для мокрой очистки газов от частиц пыли мелких фракций применяются и другие устройства, например, адсорбционного типа с использованием жидких реагентов, растворов и воды в качестве рабочих жидкостей. Целью исследования [34] являлась оценка эффективности сепарации частиц летучей золы из пылегазового потока в тарельчатой колонне (типа абсорбера). В устройстве на тарелке-лотке были установлены неподвижные клапаны, служащие для образования рабочего режима улавливания в слое абсорбента – воды. Проведенный эксперимент показал приемлемую эффективность улавливания мелкодисперсных частиц летучей золы из пылегазового потока в исследованном устройстве адсорбционного типа – колонне.

Таким образом, проведенный обзор научно-технической литературы показал, что дальнейшее изучение и интенсификация процесса пылеулавливания, совершенствование и разработка новых конструкций центробежно-инерционных устройств, в том числе скрубберов, пылеуловителей мокрой очистки, ВЗП и других пылеуловителей остаются актуальными. При этом осуществляется внедрение в промышленность новых пылеуловителей и систем обеспыливания выбросов. Результаты теоретических исследований, проводимых в том числе с применением компьютерного моделирования, большей частью направлены на описание фундаментальной картины явления или на решение узкой прикладной задачи. Известно, что получить решение уравнений, описывающих даже однофазный поток газа в трехмерных пространственных координатах, например, системы уравнений Навье – Стокса, в общем случае в виде квадратур не представляется возможным. Как показал проведенный обзор, для решения данной задачи в последнее время все чаще используются методы численного и компьютерного 3D-моделирования. Развиваемые в работах модельные представления применяются для описания улавливания пыли в конкретных устройствах при определенных технических условиях, и, как показывает практика, они не универсальны. Известные весьма существенные проблемы моделирования пылеулавливания – трудности масштабирования исследованных экспериментальных пылеулавливающих установок – также затрудняют использование результатов чисто Кошкарев С.А., Азаров В.Н. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита

теоретических и лабораторных исследований. Внедрение в промышленность новых, более совершенных технологий и пылеулавливающего оборудования связано с изменением технологического процесса и со значительными финансовыми затратами. Это, как правило, является существенной проблемой и трудно реализуемо в условиях уже существующего производства. По этой причине внедрение новых пылеуловителей в действующее производство связано с необходимостью учета особенностей технологического процесса. Это определяет подход к разработке пылеулавливающих устройств на основе экспериментальных исследований при специфических методах осуществления масштабного перехода от исследованных экспериментальных установок к промышленным устройствам.

Постановка задачи

Одними из основных источников выделения пыли при производстве керамзита являются печи обжига керамзита, сушильные камеры и посты загрузки транспортных средств. В процессе обжига керамзитового гравия образуются продукты сгорания природного газа и керамзитовая пыль. Проведенные исследования ряда источников выбросов в атмосферу на предприятиях по производству керамзита показывают, что наиболее существенный вклад в загрязнение воздушного бассейна городских и промышленных территорий вносят именно эти вещества. Они содержат пыль, а также значительные объемы продуктов сгорания природного газа.

Эффективная сепарация пыли высокой степени дисперсности и достижение незначительного проскока частиц пыли ε очищаемого пылегазового потока в многоступенчатых системах обеспыливания вентиляционно-технологических выбросов являются существенной проблемой [10, 11, 35]. Результаты исследования предприятий отрасли и печей обжига, оборудованных системами аспирации, показали, что на постах погрузки керамзита в значительном количестве выделяется керамзитовая пыль. При удельном пылевыделении $C_p = 0,5 \dots 0,8 \text{ кг/м}^3$ формируется пылегазовый поток в системах аспирации с величинами концентраций пыли до $10,3 \text{ г/м}^3$ на начальных участках. Максимально-разовые значения массового расхода пыли $M_{\text{мр}}$ на соответствующих начальных участках систем аспирации составляют от 7,0 до 11,0 г/с. Запыленность отходящих газов после холодильных барабанов печей обжига керамзитового гравия достигает значений 15 г/м^3 , а аспирационного воздуха, отсасываемого из транспортирующих механизмов, шнековых дробилок и гравия сортировок, – от 10 до 15 г/м^3 [8, 10]. При этом максимально-разовые значения пыли керамзита на некоторых участках могут достигать величины $M_{\text{мр}} = 30,0 \dots 45,0 \text{ г/с}$ [8, 35].

Для достижения высокой эффективности обеспыливающих систем целесообразно проводить дисперсионный анализ пыли, поступающей с пылегазовым потоком на очистку в пылеулавливающее оборудование, например, с использованием установки [36]. В рамках промышленного обследования был проведен отбор проб пыли керамзита в системах аспирации печей обжига керамзита, устройствах обеспыливания вентиляционно-технологических выбросов. Выполненный по результатам данного исследования анализ показал, что мелкодисперсные фракции с размером частиц $\delta_c = 10 \text{ мкм}$ и менее составляют около 90 % от общей массы пыли керамзита. Значение среднегеометрического диаметра частиц пыли керамзита δ_{50} составляет около 3,5 мкм. Для улавливания проскакивающих частиц мелких фракций пыли керамзита ($\delta_c = 1 \dots 10 \text{ мкм}$) через аппараты инерционного типа первой ступени очистки целесообразно устанавливать в последующих ступенях обеспыливания пылеулавливающие устройства с различными механизмами сепарации пыли (например, фильтры или пылеуловители «мокрой» очистки).

Кроме разработки новых конструкций центробежно-инерционных пылеуловителей и многоступенчатых очистных систем с последовательной их установкой (ВЗП, циклонов и т. п.), известны работы по совершенствованию и внедрению в промышленность и стройиндустрию новых многофункциональных газопылеулавливающих устройств [35, 37]. В работе [38] была выполнена теоретическая и экспериментальная оценка характеристик модификации предложенного аппарата с керамической насыпной насадкой при очистке выбросов от паров нефтепродуктов в зависимости от ряда параметров очищаемого газовоздушного потока (скорости движения паровоздушной смеси, высоты слоя жидкости). Проведенные исследования предложенного аппарата показали его высокую эффективность в улавливании ингредиентов из очищаемого газовоздушного потока при надежной стабильной работе [38]. Следует отметить, что выполненный комплекс исследований предложенного многофункционального устройства [35, 36, 38] показал, что модификацию устройства можно использовать в качестве пылеуловителя для очистки газов от пыли [36, 37, 39].

Кошкарев С.А., Азаров В.Н. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита

При высоких начальных концентрациях пыли в пылегазовых потоках и с учетом проблем, характерных для многоступенчатых систем очистки, с целью надежного улавливания мелких фракций керамзита, других видов пыли, твердых веществ выбросов вентиляционно-технологических и аспирационных систем стройиндустрии становится актуальной разработка новых пылеуловителей. Применение аппаратов мокрой очистки представляется одним из перспективных направлений в пылеулавливании. В разработанной конструкции пылеуловителя практически реализована двухступенчатая система очистки, сочетающая механизмы инерционной и гравитационной сепарации с осаждением, захватом частиц пыли поверхностью, барботированным, пеноподобным слоем или объемом воды рабочей жидкости. Это становится тем более важным для снижения затрат на электроэнергию при сокращения производственных площадей, занимаемых данным оборудованием. Использование предварительно получаемых данных о размерах частиц пыли в результате исследований дисперсионного анализа и экспериментального определения эффективности улавливания пыли такими пылеуловителями должно быть основой конструкторских разработок.

Описание исследования и результаты

С целью решения сложной задачи эффективного улавливания (доулавливания) частиц мелких фракций пыли, проскакивающих через аппараты первой ступени очистки систем обеспыливания, в Волгоградском государственном архитектурно-строительном университете (ВолгГАСУ) разработано устройство, изображенное на рисунке 1. Данное устройство предназначено для сепарации пыли из очищаемого пылегазового потока выбросов печей обжига керамзита с обеспечением незначительной степени проскока частиц пыли [35, 39]. Для конструктивного упрощения и снижения капитальных и эксплуатационных затрат предлагается использовать устройство, в котором реализуются несколько физических механизмов сепарации пыли [37].

В устройстве с комбинированной схемой сепарации пыли из пылегазового потока осуществляется улавливание пыли инерционно-гравитационным способом с последовательным улавливанием ее остаточных концентраций в барботированном слое воды. При этом фактически в двухступенчатом пылеуловителе для увеличения суммарной эффективности аппарата в качестве второй ступени очистки предусмотрена установка контактных камер, диаметр которых существенно меньше, чем диаметр собственно аппарата, верхняя часть которого представляет модификацию прямооточного циклона (рис. 1) [37].

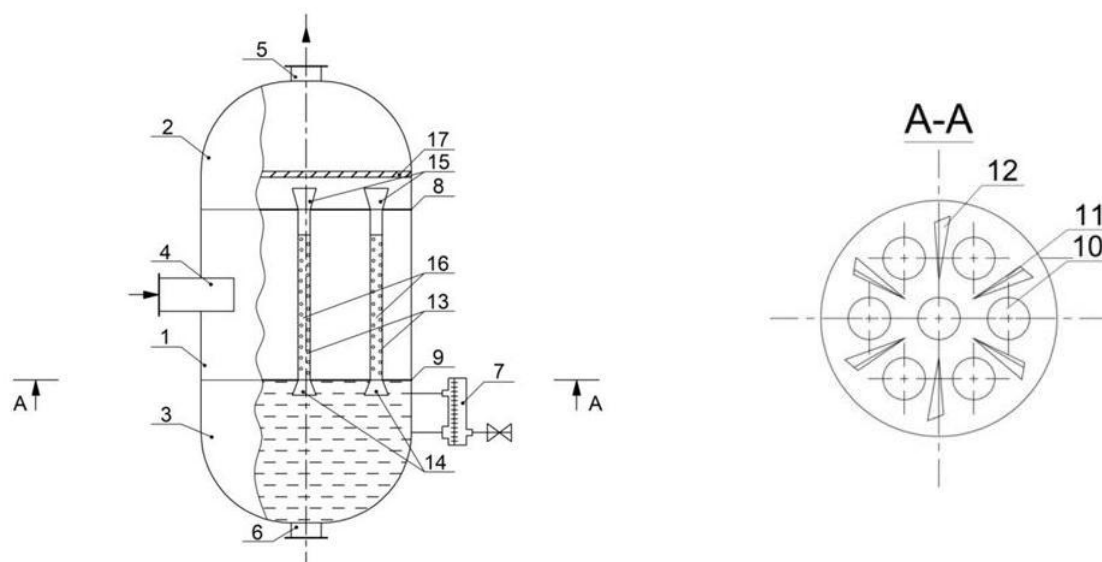


Рисунок 1. Схема пылеочистного устройства с комбинированной схемой сепарации:
 1 – корпус; 2 – сепарационный блок; 3 – поддон с жидким поглотителем; 4 – входной патрубок потока очищаемого газа в технологический блок; 5 – патрубок выхода очищенного воздуха; 6 – слив пылесодержащего шлама отработанной жидкости; 7 – регулятор уровня жидкости в поддоне; 8 и 9 – горизонтальные перегородки; 10 – отверстия в перегородке для подсоединения контактных камер; 11 – закручивающий элемент в нижней перегородке; 12 – щелевая прорезь; 13 – контактные камеры; 14 – конфузоры; 15 – диффузоры; 16 – насыпная керамзитовая загрузка; 17 – пластинчатый сепаратор

Кошкарев С.А., Азаров В.Н. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита

Достижимые при этом суммарные коэффициенты эффективности улавливания пыли способны в значительной степени повысить экологическую безопасность производства. Такие устройства предлагается использовать в системах аспирации и пневмотранспорта на комбинатах строительных материалов (ЖБИ), заводах по производству цемента, кирпича и асфальтобетона, установках по производству растворобетонных смесей и аналогичных производствах.

Устройство работает следующим образом. Подлежащий очистке пылевоздушный поток через тангенциальный входной патрубок поступает в технологический блок устройства в закрученном режиме, равномерно распределяется в межкамерном пространстве и через щелевые прорезы в нижней горизонтальной перегородке опускается к поверхности жидкости в поддоне.

Очищаемый пылевоздушный поток получает дополнительное ускорение при проходе между лопатками. Затем газожидкостная смесь поступает в контактные камеры. После отделения капель жидкости в пластинчатом сепараторе очищенный воздух отводится через выходной патрубок [33].

Внутри технологического блока размещены рабочие контактные камеры, которые в нижнем торцевом сечении снабжены опорным решетчатым элементом и конфузорами с углом сужения 15–20 градусов, а в верхнем торцевом сечении – диффузорами с углом расширения 15 градусов.

Сепарационный блок снабжен патрубком выхода очищенного воздуха, а поддон – патрубком слива жидкого шлама и регулятором подачи и поддержания уровня жидкости [38].

Экспериментальные исследования проводились в промышленных условиях на стенде, схема которого показана на рисунке 2. Основу установки составил аппарат предложенной конструкции, изготовленный из оргстекла, в полномасштабном (М 1:1) исполнении с сохранением геометрических размеров, соотношений и форм реального (промышленного) устройства.

Контактные камеры имеют диаметр 80 мм. Через патрубок выхода очищенного воздуха в сепарационном блоке экспериментальный образец подключен к вентилятору, работа которого обеспечивала разрежение в аппарате. В качестве рабочей жидкости при проведении исследований использовалась вода. Для поддержания уровня воды в блоке-поддоне предусмотрен регулятор подачи, уровень воды фиксировался визуально. Высота заполнения контактных камер водой оценивалась по шкале делений, нанесенной на стенки камеры.

Применительно к очистке выбросов от пыли при экспериментальной оценке характеристик аппарата мокрой очистки в качестве определяющих факторов были приняты:

$\bar{h}_{жск} = h_{жск} / h_{k_0}$ – уровень жидкости в конфузоре $\bar{h}_{жск}$, отсчитываемый от нижней горизонтальной перегородки, отнесенный к высоте конфузора h_{k_n} , изменялся в интервале от –0,16 до 0;

$\bar{h}_k = h_k / d_k$ – высота контактной камеры \bar{h}_k , отнесенная к диаметру контактной камеры d_k , изменялась в интервале от 7,5 до 12,5.

Определяющие факторы x_1 и x_2 имели вид, рекомендованный литературой, например, [40]:

$$x_1 = \frac{\bar{h}_{жск} - \bar{h}_{жск0}}{\Delta \bar{h}_{жск}}, \quad x_2 = \frac{\bar{h}_k - \bar{h}_{k0}}{\Delta \bar{h}_k}. \quad (1)$$

В качестве функций отклика были приняты степень проскока пыли в аппарате и приведенный коэффициент местного сопротивления аппарата ξ , характеризующий аэродинамическое сопротивление устройства в рабочем гидродинамическом режиме. Концентрация пыли в реальных условиях на входе в опытно-промышленную установку изменялась незначительно и составляла до 500 мг/м³.

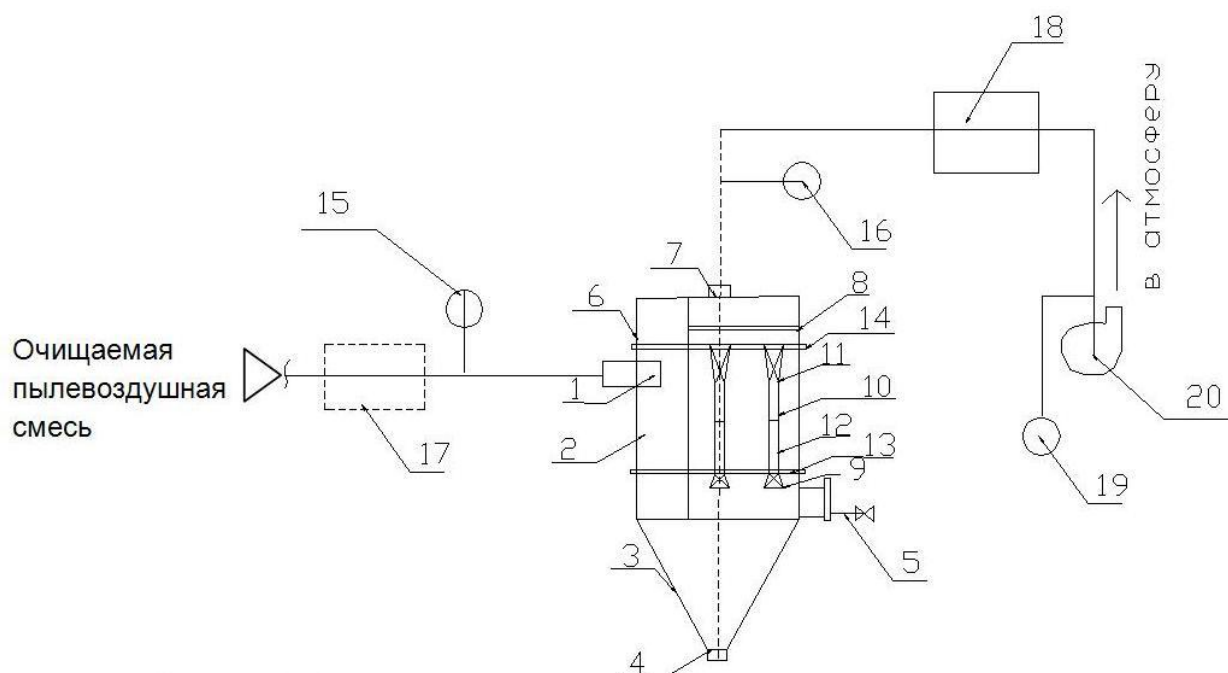


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки:

- 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 – конфузоры; 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 экспериментальных исследований по оценке характеристик предложенного аппарата приведены в таблице 1 и на рисунке 3.

На рисунке 3 представлены сводные результаты исследований в виде экспериментально полученных зависимостей в графическом виде, характеризующих изменение степени проскока пыли в аппарате при различных режимных параметрах его работы при использовании воды в качестве рабочей жидкости.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований

Уровень жидкости в конфузоре, отнесенный к общей высоте конфузора, $\bar{h}_{жк}$	Высота контактной камеры, отнесенная к диаметру контактной камеры, $\bar{h}_к$	Степень проскока пыли в аппарате, ε , %
1	2	3
-0,16	7,5	24,16
-0,16	10	20,38
-0,16	12,5	15,21
-0,08	7,5	16,40
-0,08	10	12,62
-0,08	12,5	7,45
0	7,5	9,17
0	10	5,39
0	12,5	0,22

В качестве рабочей жидкости в устройстве использовалась вода. По результатам математической обработки экспериментальных данных регрессионная зависимость изменения

степени проскока пыли от общей высоты слоя жидкости $\bar{h}_{жкк}$ в контактной камере и высоты контактной камеры, отнесенной к диаметру контактной камеры, $\bar{h}_к$.

$$\varepsilon = 0,898(\bar{h}_{жкк} - 5)^2 - 0,001(\bar{h}_к - 2,3)^2 - 2,1267 \quad (2)$$

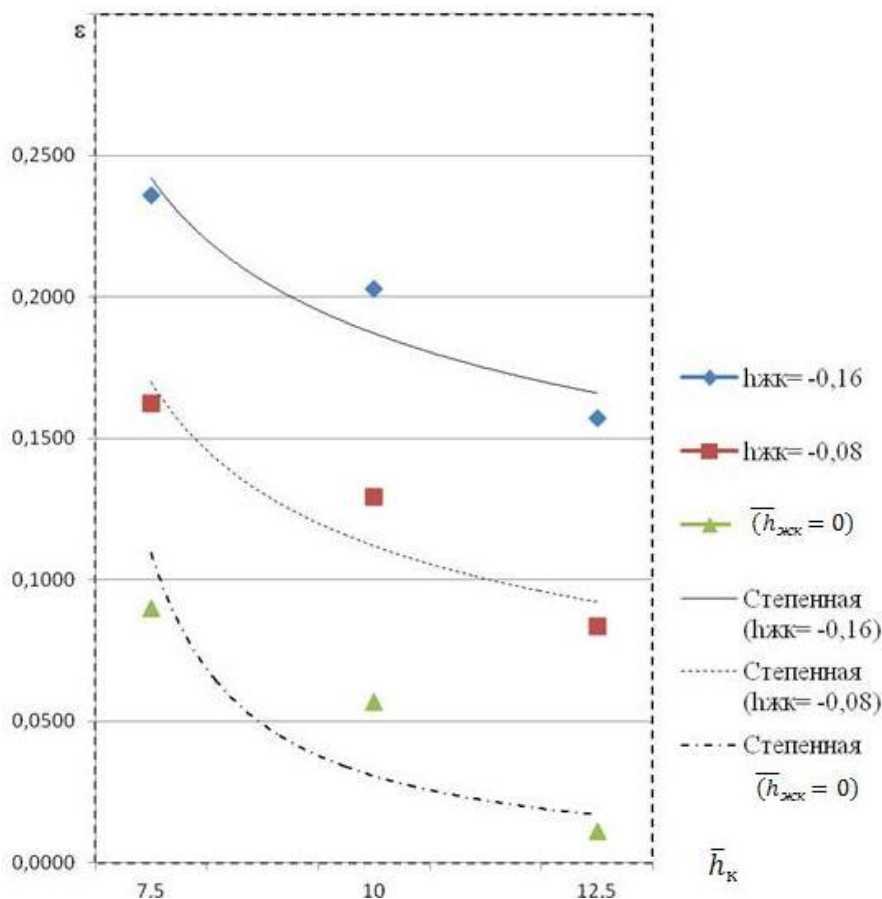


Рисунок 3. Изменение степени проскока пыли ε в зависимости от уровня жидкости в конфузоре, $\bar{h}_{жкк}$ ($\bar{h}_{жкк}$ изменялась от $-0,16$ до $0,0$), и высоты контактной камеры, отнесенной к диаметру контактной камеры, $\bar{h}_к$ (величина изменялась в интервале от $7,5$ до $12,5$).

Показанные на рисунке 3 зависимости соответствуют режимным параметрам аппарата, при которых достигается минимальное значение степени проскока пыли (наибольшая эффективность пылеулавливания).

На рисунке 4 представлены сводные результаты исследований в виде графических зависимостей, характеризующих изменение приведенного коэффициента местного сопротивления ξ аппарата при различных режимных параметрах его работы:

$$\xi = 2\Delta P / (\rho_{вых} v_{вых}^2), \quad (3)$$

где ΔP – потери давления в аппарате (Па); $\rho_{вых}$ – плотность газа на выходе, $v_{вых}$ – скорость газа на выходе.

Данные получены в эксперименте при использовании воды в качестве рабочей жидкости – агента.

На рисунке 5 представлены сводные результаты исследований в виде графических зависимостей, характеризующих изменение потерь давления ΔP (Па) в аппарате при различных режимных параметрах его работы. Данные получены в эксперименте при использовании воды как рабочей жидкости.

Кошкарёв С.А., Азаров В.Н. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита

Наибольшие потери давления отмечаются при высоте воды в конфузоре, отнесенного к общей высоте конфузора, $\bar{h}_{жк} = 0$.

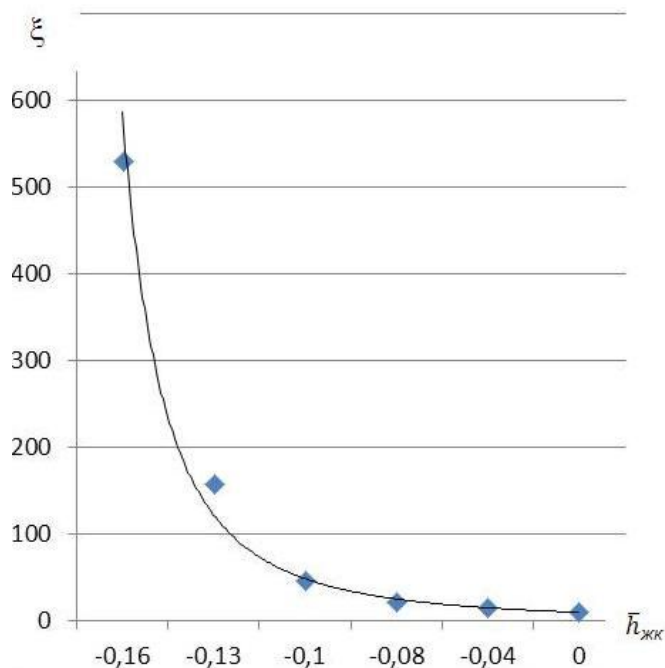


Рисунок 4. Изменение приведенного коэффициента местного сопротивления ξ степени в зависимости от высоты слоя воды $\bar{h}_{жк}$ в рабочем гидродинамическом режиме ($\bar{h}_{жк}$ изменялась от $-0,16$ до $0,0$)

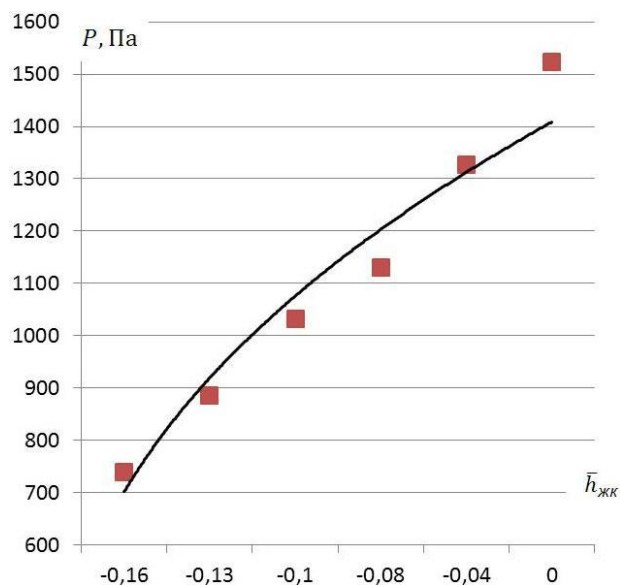


Рисунок 5. Изменение потерь давления ΔP , Па, в аппарате в зависимости от высоты слоя воды в конфузоре $\bar{h}_{жк}$ ($\bar{h}_{жк}$ изменялась от $-0,16$ до $0,0$)

Практическая значимость и внедрение

Для эффективного улавливания мелких фракций пыли керамзита выбросов вентиляционно-технологических и аспирационных систем стройиндустрии целесообразно проектировать многоступенчатые системы очистки. Более эффективным представляется применение в системах обеспыливания аспирационных систем, во второй ступени очистки – аппаратов ВЗП с отсосом из бункерной части или высокоинтенсивных аппаратов мокрой очистки, где реализуются различные по физической природе механизмы пылеулавливания. Такие композиции систем обеспыливания и высокоинтенсивных аппаратов мокрой очистки имеют большое практическое значение и находят применение в стройиндустрии [11, 14, 35]. В настоящей работе приведены результаты исследования опытно-промышленной установки мокрой очистки, испытания которой были успешно проведены на одном из заводов ЖБИ Волгоградской области.

Выводы

1. Анализ полученных данных о зависимости аэродинамического сопротивления аппарата показал следующее. Значения потерь давления ΔP в аппарате и величины приведенного коэффициента местного сопротивления ξ и высоты уровня жидкости в конфузоре $\bar{h}_{жк}$ зависят от изменения уровня заполнения аппарата водой. Анализ данных также показывает, что приемлемое значение степени проскока пыли ε и величины аэродинамического сопротивления (потерь давления ΔP) в устройстве наблюдаются в диапазоне значений высоты слоя воды $\bar{h}_{жк}$ в конфузоре от 0,08 до 0,0 (геометрическая высота слоя в интервале от 0,08 до 0,125). Если характеристика применяемого в системе аспирации тягодутьевого устройства позволяет проводить процесс при $\bar{h}_{жк} = 0$, то данную величину $\bar{h}_{жк}$ можно считать предпочтительной. Если располагаемый напор установленного в системе аспирации тягодутьевого устройства позволяет проводить процесс в интервале значений высоты слоя воды $\bar{h}_{жк}$ в конфузоре от 0,08 до 0,0, то данную величину $\bar{h}_{жк}$ можно считать допустимой и приемлемой с точки зрения практического использования.

2. Также экспериментально установлено, что наименьшая степень проскока пыли достигается при уровне жидкости в конфузоре, отнесенного к общей высоте конфузора, $\bar{h}_{жк} = 0$. Потери давления в аппарате при этом максимальны. При уменьшении уровня (высоты) жидкости в конфузоре степень проскока пыли увеличивается, достигая максимального значения при $\bar{h}_{жк} = -0,16$ с минимальным значением потери давления в аппарате.

3. Снижению степени проскока пыли способствует также увеличение высоты контактной камеры. При значении высоты контактной камеры, отнесенной к диаметру, $\bar{h}_к = 12,5$ коэффициент проскока принимает наименьшие значения в исследованном диапазоне гидродинамических режимов. Изменение коэффициента проскока частиц пыли при значении высоты $\bar{h}_к \geq 10$ незначительно. Для обеспечения технически надежной эксплуатации устройства значение относительной высоты контактной камеры целесообразно принять $\bar{h}_к = 10$.

4. Применять такие аппараты для очистки выбросов печей обжига керамзита с высокой эффективностью улавливания пыли можно при значительных начальных концентрациях содержания пыли в очищаемом пылегазовом потоке. Исходя из практического опыта эксплуатации, пылеуловители мокрой очистки целесообразно использовать в многоступенчатых системах обеспыливания вентиляционно-технологических выбросов в качестве второй ступени очистки [11, 14, 35]. При этом обеспечивается более стабильная и надежная работа устройства при относительно меньших концентрациях содержания пыли в очищаемом пылегазовом потоке и достигаются меньшие значения проскока пыли ε [11, 14, 35]. Таким образом, совершенствование систем очистки таких выбросов может быть реализовано на основе применения высокоэффективного инерционно-гравитационного механизма сепарации с последующим барботированием в слое воды в одном устройстве. Результатом внедрения таких устройств в отрасли станет решение актуальной проблемы повышения экологической безопасности стройиндустрии при снижении валового количества пыли, выбрасываемой в атмосферу.

Литература

1. Постановление Правительства РФ «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» от 15 апреля 2014 г. № 323 // Интернет-портал "Российской Газеты". 2014 г. с изм. и допол. в ред. от 02.05.14.
2. Горин В.М. Применение керамзитобетона в строительстве – путь к энерго- и ресурсоэффективности, безопасности зданий и сооружений // Строительные материалы. 2010. №8. С. 8–11.
3. Семенов А.А. Состояние российского рынка керамзита // Строительные материалы. 2010. №8. С. 6–8.
4. Sadovnikova N., Parigyn D., Sanzhapov B., Gnednikova E. Evaluating of sustainability of Volgograd // WIT Transaction on Ecology and the Environment. 2013. Vol. 1. Pp. 279–290.
5. Борщевский А.А. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий. М.: Высшая школа, 1987. 367 с.
6. Баширов Х.З. Повышение эксплуатационной надежности производственных зданий и сооружений на транспорте: монография. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2010. 341 с.
7. Технология производства керамзита [Электронный ресурс]. URL: <http://www.euravitebsk.org/news/148-expanded-clay.html>. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. (дата обращения: 15.01.2015).
8. Онацкий С.П. Производство керамзита. М.: Стройиздат, 1987. 333 с.
9. Балтеренас П.С. Обеспыливание воздуха на предприятиях строительных материалов. М.: Стройиздат, 1990. 180 с.
10. Азаров В.Н. Сергина, Н. М. Системы пылеулавливания с инерционными аппаратами в производстве строительных материалов // Строительные материалы. 2003. №8. С. 14–15.
11. Сергина Н.М. [и др.] Системы инерционного пылеулавливания в промышленности строительных материалов // Строительные материалы. 2013. №2. С. 66–68.
12. Слободян С.М., Куц В.П. Системы пылеулавливания с инерционными аппаратами в производстве строительных материалов // Безопасность жизнедеятельности. 2014. №8. С. 55–59.
13. Сергина Н.М. [и др.] Пути снижения выброса пыли извести в атмосферу при производстве строительных материалов // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №12(134). С. 48–50.
14. Сергина Н.М., Азаров Д.В., Гладков Е.В. Системы инерционного пылеулавливания в промышленности строительных материалов // Стройматериалы. 2013. №2. С. 86–88.
15. Грибова И.Г. Тычкина О.В., Белошейкин В.А. Внедрение аспирационнопылеулавливающей установки на ООО «Саткинский щебзавод» // Стройматериалы. 2010. №8. С. 20–22.
16. Рабинович В.Б. Исследование и разработка мокрых пылеуловителей СИОТ с шаровыми насадками // Безопасность жизнедеятельности. 2010. №1. С. 48–51.
17. Шияев М.И., Пенявский В.В. Экспериментальное определение констант универсального метода расчета инерционных пылеуловителей // Известия вузов НГАСУ. Строительство. 2013. №8. С. 64–71.
18. Ватин Н.И., Гиргидов А.А., Стрелец К.И. Численное моделирование трехмерного поля скорости в циклоне // Инженерно-строительный журнал. 2011. №5. С. 5–9.
19. Ватин Н.И., Стрелец К.И. Определение характеристик сварочных искр для расчета их удаления в циклоне // Инженерно-строительный журнал. 2011. №5. С. 25–30.
20. Strelets K.I., Kitain M.B., Petrochenko M.V. Welding Spark Parameters Determination for Cyclone Removal Calculation // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 941. Pp. 2098–2103.
21. Vatin N.I., Strelets K.I., Kharkov N. Gas Dynamics in a Counter flow Cyclone with Conical Nozzles on the Exhaust Pipe // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 635. Pp. 17–21.
22. Chol-Ho Hong, Ji-Won Han, Byeong-Sam Kim, Cha-Sik Park, Oh Kyung Kwon. The effect of cyclone shape and dust collector on gas-solid flow and performance // International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering. 2012. No. 6. Pp. 37–42.
23. Cortes C., Gil A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators // Progress in energy and combustion Science. 2007. Vol. 33. No. 5. Pp. 409–452.

24. Wang B. [et al]. Numerical study of gas–solid flow in a cyclone separator // Applied Mathematical Modelling. 2006. Vol. 30. No. 11. Pp. 1326–1342.
25. Wu J., Zhang Y., Wang H. Numerical study on tangential velocity indicator of free vortex in the cyclone // Separation and Purification Technology. 2014. Vol. 132. Pp. 541–551.
26. Valery N. Azarov, Dmitri P. Borovkov, Awadh M. Redhwan Application of Swirling Flows in Aspiration Systems // International review of mechanical engineering. 2014. Vol.8. No.4. Pp. 750–753.
27. Стрелец К.И. Гидравлические основы расчета пылеудаления в противоточных циклонах : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.16. СПб., 2010. 23 с.
28. Strelets K., Petrochenko M., Girgidov A. Energy Performance of Particle Settling in Cyclones // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 725. Pp. 1363–1371.
29. Белоусов А.С. Гидродинамика процессов с неоднородными структурами закрученных гетерогенных потоков в вихревых аппаратах : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.17.08. М., 2010. 32 с.
30. Lee B.K., Jung K.R., Park S.H. Development and application of a novel swirl cyclone scrubber (1) Experimental // Journal of Aerosol Science. McFarland A. R. 2008. Vol. 39. No 12. Pp. 1079–1088.
31. Park S.H., Lee B.K. Development and application of a novel swirl cyclone scrubber:(2) Theoretical // Journal of hazardous materials. 2009. Vol. 164. No. 1. Pp. 315–321.
32. Marthinussen S.A. [et al]. Removal of particles from highly viscous liquids with hydrocyclones // Chemical Engineering Science. 2014. Vol. 108. Pp. 169–175.
33. Vieira L.G.M., Barrozo M.A.S. Effect of vortex finder diameter on the performance of a novel hydrocyclone separator // Minerals Engineering. 2014. Vol. 57. Pp. 50–56.
34. Wang Q., Chen X., Gong X. Theoretical and experimental investigation on the characteristics of fly-ash scrubbing in a fixed valve tray column // AIChE Journal. 2013. Vol. 59. No. 6. Pp. 2168–2178.
35. Кошкарев С.А., Кисленко Т.А. О применении аппарата пылеулавливания с комбинированной схемой сепарации пыли из пылегазового потока в производстве керамзита // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №11. С. 47–49.
36. Патент №135806, Россия, U1 МПК G01N 15/00. Устройство для определения дисперсного состава пыли. Кошкарев С.А., Азаров В. Н. [и др.]. Заявка №2013121082/28. Заявлено 07.05.2013. Оpubл. бюллетень № 35 20.12.2013.
37. Патент №139122 Россия, МКИ В 01 Д 47/02. Устройство для очистки газов / Кошкарев С.А., Азаров В. Н., Кисленко Т.А [и др.]. Заявка №2013138200/05. Заявлено 15.08.2013. Оpubл. бюллетень №10 10.01.2014.
38. Соколова Е.В. Повышение экологической безопасности городских автозаправочных станций: автореф. дис. ... канд. техн. наук : Волгоград, 2013. 20 с.
39. Кисленко Т.А., Кошкарев С.А. [и др.] О значимости параметров инерционных устройств очистки вентиляционных выбросов в производстве керамзита // Современные проблемы науки и образования. 2014. №1. [Электронный ресурс] Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://www.science-education.ru/115-12003> (дата обращения: 10.01.2015).
40. Ермаков С.М. Математическая теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 2007. 318 с.

*Сергей Аркадьевич Кошкарев, г. Волгоград, Россия
Тел. моб.: +7(961)0702377; эл. почта: cool.koshka12@mail.ru*

*Валерий Николаевич Азаров, г. Волгоград, Россия
Тел. раб.: +7(8442)969907; эл. почта: kaf_bgdvt@mail.ru*

© Кошкарев С.А., Азаров В.Н., 2014