

К экспериментальной оценке эффективности аппарата мокрой очистки в системах обеспыливания выбросов в атмосферу от печей обжига керамзита

В.Н. Азаров, С.А. Кошкарев, Л. Я. Соломахина

*Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет,
Волгоград*

Аннотация: В статье рассмотрен перспективный способ сокращения выбросов пыли в атмосферу в производстве керамзита, используя высокоэффективный аппарат мокрой очистки аппаратом с комбинированной схемой пылеулавливания в обеспыливающих системах аспирации. В работе представлены данные промышленного обследования систем аспирации и результаты дисперсионного анализа керамзитовой пыли, выделяющейся от печей обжига. Обоснованы принципы разработки новых конструкций пылеуловителей с использованием результатов дисперсионного анализа улавливаемой пыли. В статье описан предложенный пылеуловитель для мокрой очистки для использования в системах обеспыливания систем аспирации в производстве керамзита и стройиндустрии. Выполнены эксперименты по оценке степени проскока частиц пыли и получена зависимость коэффициента улавливания частиц пыли устройством от параметров работы пылеуловителя. Проведены испытания разработанного пылеуловителя мокрой очистки, обеспечивающего значительное снижение выбросов пыли улавливаемой пыли керамзита в атмосферу.

Ключевые слова: Пыль, керамзит, пылеуловитель, мокрая очистка, эффективность, дисперсионный анализ, выбросы, атмосфера, система, обеспыливание

Производство искусственных пористых заполнителей (керамзитового гравия и песка) для легких бетонов является одним из наиболее динамично развивающихся отраслей строительной индустрии.

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 [1-4].

Особенность производства пористых заполнителей (в частности керамзитового гравия) состоит в последовательном осуществлении ряда сложных в экологическом отношении операций переработки сыпучих

материалов, включая их термическую обработку. 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 из очищаемого газопылевого потока.

Проведенный анализ показал, что в производстве керамзитового гравия для обеспыливания применяются установки, имеющие две, три и более ступеней очистки. Причем, в качестве первой ступени, как правило, устанавливаются циклоны ЦН, в качестве последующих ступеней – рукавные фильтры и электрофильтры [5]. На практике вытяжные вентиляционные системы также оборудуются многоступенчатыми системами пылеочистки выбросов. 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 значительной энергоемкостью. К тому же такие установки являются достаточно дорогими и сложными в эксплуатации [6-8].

Так в работах [7-9] указаны пути снижения пыли в атмосферу при использовании аппаратов устройств центробежно-инерционных типа (ВЗП, циклонов) в системах обеспыливания, применяющихся в производстве строительных материалов. В статьях [10, 11] представлены описание схем систем пылеулавливания с дополнительной установкой последовательно третьего аппарата ВЗП при высоких значениях концентраций пыли в подаваемом на очистку пылегазовом потоке, которые рекомендуется

использовать на предприятиях стройиндустрии, и в том числе в системах обеспыливания для производства керамзита. 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 [10, 11].

Другим перспективным направлением является совершенствование и разработка новых конструкций центробежно-инерционных пылеуловителей. В работы [12 -16] были посвящены исследованию пылеулавливания и разработке новых пылеуловителей циклонного типа. В статье [12] приведены результаты исследований процесса улавливания летучей золы в экспериментальной модели электроциклона. Установлено, что в разработанной конструкции аппарата степень очистки при электроциклонном режиме значительно выше (близка к 100%), чем при циклонном (90-90%). В работе [13] приведены результаты исследований влияния формы циклона и пылесборника на пылегазовый поток в аппаратах инерционного типа (циклоне) на эффективность работы и производительность устройств. В статье [14] приведены результаты экспериментального исследования и численного моделирования изменение и падение аэродинамического давления – одного из существенных параметров характеристики циклонов с применением численного моделирования гидродинамики очищаемого потока газа (CFD) с учетом изменяющихся напряжений Рейнольдса (RSM). В статье [15] разработана теоретическая модель с использованием параметра времени пребывания частиц в устройствах (среднего времени пребывания) для расчета эффективности улавливания циклоном. Получена полуэмпирическая модель, являющейся функцией основных размеров циклонов и эксплуатационных параметров без аналитического решения уравнений математического описания физической

сущности процесса сепарации пыли в циклоне. В работе [16] представлены результаты разработки и испытания циклонного сепаратора, область аэродинамических режимов для которого была задана в интервале расхода воздуха от 10 и до 100 л/мин с достижением максимально возможной эффективности улавливания частиц пыли мелких фракций (1-10 мкм) низкой плотности.

Продолжаются исследования по разработке новых конструкций центробежно-инерционных устройств мокрой очистки газов (циклонов скрубберов) с применением методов численного моделирования описания и расчета пылеулавливания, например, [17-18]. Так в статье [17] представлены результаты исследования численного решения уравнений Эйлера, описывающих гидродинамику течения трехфазных потоков (газ – жидкость – твердое тело) и оценки эффективности очистки очищаемого потока газа от пыли в скруббере мокрой очистки. Целью исследования [18] являлась оценка эффективности сепарации частиц летучей золы из пылегазового потока. В колонне на лотках – тарелках были установлены неподвижные клапаны таким образом, чтобы обеспечить необходимый рабочий режим улавливания в слое абсорбента – воды.

Так в статьях [19-21] рассмотрены вопросы численного моделирования (CFD) движения одно- и двухфазных потоков в инерционных аппаратах. В исследованиях [20-21] 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, как моделирования улавливания пыли, так и для исследованной конструкции скруббера.

В работе [22] рассматриваются вопросы математического описания полей течения обратных (восходящих) потоков газа внутри циклонов, снижающих эффективность пылеулавливания. Рассмотрены модели на основе традиционного подхода, в том числе для определения тангенциальной скорости и перепада давления внутри циклонов. В работе предложено использовать понятие «естественной» длиной циклона, которое объясняет причины нестабильности работы и образования вторичных потоков в циклоне. Приведен обзор последних и численного моделирования (CFD) циклонов, стационарных одно- и двухфазных потоков, и нестационарных течений. Рассмотрены перспективные направления этой области исследований с точки зрения автора [22].

При этом достижение высокого коэффициента эффективности улавливания мелкодисперсной пыли η , и, следовательно, незначительной величины показателя проскока частиц пыли ε из очищаемого пылегазового потока в многоступенчатых системах обеспыливания вентиляционно-технологических выбросов является трудной инженерно-технологической задачей [8, 10, 11].

Для достижения высокой степени эффективности работы обеспыливающих систем целесообразно проводить дисперсионный анализ пыли, поступающей с пылегазовым потоком на очистку в пылеулавливающее оборудование, например, с использованием установки [19]. В рамках проведенного промышленного обследования были 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 пыли керамзита $\delta_q=10$ мкм и менее составляют около 90% от общей массы пыли керамзита. Значение среднемедианного диаметра частиц пыли керамзита δ_{50} изменяется в зависимости от места

обора проб и выпускаемой продукции (керамзитового гравия, песка) от 2 до 5 мкм. Для улавливания "проскакивающих" частиц мелких фракций пыли через аппараты инерционного типа первой ступени очистки целесообразно устанавливать в последующих ступенях обеспыливания пылеулавливающие устройства с отличными механизмами сепарации пыли (например, фильтры, или пылеуловители «мокрой» очистки).

Таким образом, проведенный обзор только части 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. Использование экспериментально получаемых при дисперсионном анализе данных о размерах частиц и эффективности улавливания пыли такими устройствами должны быть основой таких конструкторских разработок.

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, показывает, что наиболее существенный вклад в загрязнении воздушного бассейна городских и промышленных территорий вносят именно эти вещества. Соответственно они содержат пыль, а так же значительные объемы продуктов сгорания природного газа. Результаты исследования принятой к исследованию выборки систем аспирации печей обжига керамзита ряда предприятий отрасли показали, что на постах погрузки керамзита выделяется керамзитовая пыль с удельным пылевыведением $C_{п}=0,5-0,8$ кг/м³.

Запыленность отходящих газов пыле воздушного потока воздуха в системах аспирации, поступающего из технологических объемов транспортирующих механизмов, шнековых дробилок и гравия сортировок может достигать от 10 до 15 г/м³ [6, 10]. При этом максимально-разовые значения пыли керамзита на некоторых участках может достигать величины $M_{\text{мр}}=30,0-45,0$ г/с [6, 10, 11, 12]. При этом в системах аспирации формируется пылегазовый поток с величинами концентраций пыли от 7,0 до 10,3 г/м³ на начальных участках. Максимально-разовые значения массового расхода пыли на соответствующих начальных участках систем аспирации составляют $M_{\text{мр}}=7,0-11,0$ г/с.

С целью решения сложной задачи эффективного улавливания (доулавливания) частиц мелких фракций пыли, уносимых воздушным потоком из аппаратов первой ступени очистки обеспыливающих устройств систем аспирации предприятий стройиндустрии, на кафедре безопасности жизнедеятельности в техносфере Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета разработано устройство, предназначенное для улавливания частиц пыли из очищаемого пылегазового потока выбросов в атмосферу [23]. Данное устройство было предложено использовать в системах обеспыливания систем аспирации печей обжига керамзита с обеспечением незначительной величины проскока частиц пыли, в котором реализуются несколько физических принципов механизмов сепарации пыли [24]. Для конструктивного упрощения, снижения капитальных и эксплуатационных затрат предлагается использовать данное устройство в системе очистки выбросов от печи обжига керамзита. Следует отметить, что проведен комплекс исследований предложенного пылеуловителя, который показал его высокую эффективность улавливания ингредиентов из очищаемого пылевоздушного потока при приемлемом аэродинамическом сопротивлении и надежной работе [23, 24].

В устройстве с комбинированной схемой сепарации пыли из пылегазового потока осуществляется первичное улавливание пыли инерционно-гравитационным способом с последовательным улавливанием её остаточных концентраций в барботированном слое воды. При этом фактически для увеличения суммарной эффективности аппарата в пылеуловителе реализована двухступенчатая схема очистки, в качестве второй ступени очистки предусмотрена установка контактных камер, диаметр которых существенно меньше, чем диаметр собственно аппарата, верхняя часть которого представляет модификацию прямоточного циклона [20]. 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 т.п. производствах.

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

$\bar{h}_{жк} = h_{жк}/h_{к0}$ уровень жидкости в конфузоре $\bar{h}_{жк}$, отсчитываемый от нижней горизонтальной перегородки, отнесенный к высоте конфузора $h_{к0}$, изменялся в интервале от -0,16 до 0;

$\bar{h}_к = h_к/d_к$ высота контактной камеры $\bar{h}_к$, отнесенная к диаметру контактной камеры $d_к$, изменялась в интервале от 7,5 до 12,5.

Определяющие факторы имели вид, рекомендованный литературой [25 – 27].

$$x_1 = \frac{\bar{h}_{жск} - \bar{h}_{жск0}}{\Delta \bar{h}_{жск}}, \quad x_2 = \frac{\bar{h}_к - \bar{h}_{к0}}{\Delta \bar{h}_к} \quad (1)$$

В качестве функций отклика были приняты эффективность улавливания пыли в аппарате и приведенный коэффициент местного сопротивления аппарата ξ , характеризующий аэродинамическое сопротивление устройства в рабочем гидродинамическом режиме.

Определяющие факторы x_1 и x_2 имели вид, рекомендованный литературой [25 – 27]

$$x_1 = \frac{\bar{h}_{жск} - \bar{h}_{жск0}}{\Delta \bar{h}_{жск}}, \quad x_2 = \frac{\bar{h}_к - \bar{h}_{к0}}{\Delta \bar{h}_к} \quad (1)$$

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

В качестве рабочей жидкости в устройстве использовалась вода. Математическая обработка результатов эксперимента с применением рекомендаций [25 – 27], позволила получить зависимость изменения эффективности улавливания пыли в устройстве от общей высоты слоя жидкости $\bar{h}_{жск}$ в контактной камере и высоты контактной камеры, отнесенной к диаметру контактной камеры, $\bar{h}_к$ регрессионного вида

$$\eta = 1 - \left[0,898(\bar{h}_{жск} - 5)^2 - 0,001(\bar{h}_к - 2,3)^2 - 2,1267 \right] \quad (2)$$

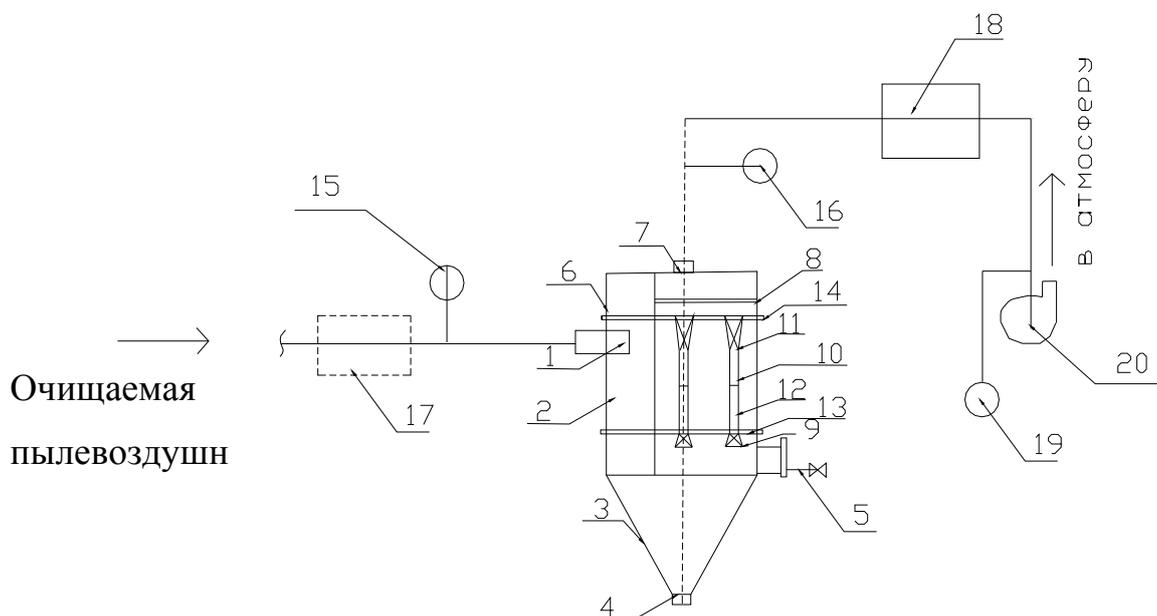


Рис. 1. – Схема экспериментальной установки.

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 – 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

Экспериментально установлено, что максимальная эффективность улавливания пыли в устройстве достигается при максимальном уровне (высоте) жидкости в конфузоре, отнесенного к общей высоте конфузора,

$\bar{h}_{жск.}=0$. Потери давления в аппарате ΔP при этом максимальны и достигают значения около 1500 Па. При уменьшении уровня (высоты) жидкости в конфузоре эффективность улавливания пыли устройством снижается, достигая минимального значения при минимальном значении потери давления в аппарате ΔP (около 800 Па).

Изменение коэффициента эффективности улавливания пыли в устройстве проскока частиц пыли при $\bar{h}_k \geq 10$ незначительно, и для обеспечения надежной работы устройства и снижения трудоемкости при эксплуатации, значение относительной высоты контактной камеры целесообразно принимать $\bar{h}_k=10$.

Выводы

Совершенствование систем очистки выбросов промышленности и стройиндустрии может быть реализовано на основе применения предложенного устройства. В исследованном пылеуловителе, сочетающим высокоэффективный инерционно-гравитационный механизм сепарации основной массы пыли и последующее улавливанием её остаточных концентраций барботирующим слоем воды. Основным результатом исследования стало определение принципиальной возможности пылеулавливания в устройстве и области аэродинамических режимов работы. При этом на экспериментальной установке получены данные по эффективности улавливания пыли керамзита, максимальное значение которой составило $\eta=99,78$ % (минимальная величина проскока пыли $\varepsilon=0,22\%$). Результатом проведенного исследования может стать внедрение в практику одного из эффективных методов решения актуальной проблемы: повышения экологической безопасности стройиндустрии, в т.ч. производства керамзита, – при снижении выбросов пыли системами аспирации печей обжига и других подобных источников загрязнения атмосферы.

Литература

1. Борщевский, А. А. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий. М.: Высшая школа, 1987. 326 с.
 2. Ицкович, С. М. Заполнители для бетона. Минск: Вышэйшая школа, 1983. 256 с.
 3. Комар, А. Г. Строительные материалы и изделия. М.: Высшая школа, 1988. 527 с.
 4. Технология производства керамзита // euravitebsk.org/ URL: euravitebsk.org/news/148-expanded-clay.html.
 5. Онацкий, С. П. Производство керамзита. М.: Стройиздат, 1987. 405 с.
 6. Балтеренас, П. С. Обеспыливание воздуха на предприятиях строительных материалов. М.: Стройиздат, 1990. 180 с.
 7. Сергина, Н. М. Системы инерционного пылеулавливания в промышленности строительных материалов // Строительные материалы. 2013. №2. С. 66-68.
 8. Сергина, Н. М. Боровков, Д.П., Семенова, Е.А.. Совершенствование методов очистки воздуха рабочей зоны от пыли известкового щебня, выделяющейся при разгрузке железнодорожных вагонов // Инженерный вестник Дона, 2012, вып. 4 (№2). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1471.
 9. Сергина, Н. М. Пути снижения пыли извести в атмосферу при производстве строительных материалов // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №11. С. 53-55.
 10. Сергина, Н. М., Семенова, Е. А., Кисленко, Т. А. Система обеспыливания для производства керамзита // Инженерный вестник Дона, 2013 . Вып. 4 (№4). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2013.
-

11. Сергина, Н. М., Азаров, Д. В., Гладков, Е. В. Системы инерционного пылеулавливания в промышленности строительных материалов // Строительные материалы. 2013. №2. С. 86-88.
 12. Инюшкин, Н.В., Ермаков, С.А., Титов, А.Г., Исследование процесса улавливания летучей золы в экспериментальной модели электроциклона // Инженерный вестник Дона, 2011. №4 (вып. 4). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/524.
 13. Nabil Kharoua, Lyes Khezzer, Zoubir Nemouchi. Study of the pressure drop and flow field in standard gas cyclone models using the granular model// International Journal of Chemical Engineering. Volume 2011 (2011), 11p.
 14. 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, №6, 2012, p. 37-42.
 15. Zhao B. Prediction of gas-particle separation efficiency for cyclones: A time-of-flight model //Separation and Purification Technology. – 2012. – Т. 85. – p. 171-177.
 16. Bardin-Monnier N. et al. Comparison of two methods of cyclones simulation: semi-empiric model and CFD. Example of a specific cyclone design //Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. – 2013. – Т. 8. – №. 1. – p. 93-103.
 17. Li L. et al. Numerical Simulation of Three-phase Flow in the Scrubber for a Cascade-ring Foam Tower Using a Combined Euler-discrete Phase Model //Proceedings of the CSEE. – 2012. – Т. 5. – p. 012.
 18. 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. – Т. 59. – №. 6. – p. 2168-2178.
-

19. Lee B. K., Jung K. R., Park S. H. Development and application of a novel swirl cyclone scrubber—(1) Experimental //Journal of Aerosol Science. – 2008. – Т. 39. – №. 12. – p. 1079-1088. HU S., Mcfarland A. R.
 20. Park S. H., Lee B. K. Development and application of a novel swirl cyclone scrubber:(2) Theoretical //Journal of hazardous materials. – 2009. – Т. 164. – №. 1. – p. 315-321.
 21. Li L. et al. Numerical Simulation of Three-phase Flow in the Scrubber for a Cascade-ring Foam Tower Using a Combined Euler-discrete Phase Model //Proceedings of the CSEE. – 2012. – Т. 5. – p. 012
 22. Cortes C., Gil A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators //Progress in energy and combustion Science. – 2007. – Т. 33. – №. 5. – p. 409-452.
 23. 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 10.04.2014.
 24. 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
 25. Батрак, А. П. Планирование и организация эксперимента. Красноярск: ИПЦ СФУ, 2007. 60 с.
 26. Ермаков, С. М. Математическая теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 2007. 320 с.
 27. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента. М.: Мир, 1981. 520 с.
-

References

1. Borshhevskij, A. A. Mehanicheskoe oborudovanie dlja proizvodstva stroitel'nyh materialov i izdelij [Mechanical equipment for the production of building materials and products]. M.: Vysshaja shkola, 1987. 326 p.
 2. Ickovich, S. M. Zapolniteli dlja betona [Aggregates for concrete] Minsk: Vyshnejshaja shkola, 1983. 256 p.
 3. Komar, A. G. Stroitel'nye materialy i izdelija [Building materials and products] M.: Vysshaja shkola, 1988. 527 p.
 4. Tehnologija proizvodstva keramzita [Technology of production of expanded clay] // euravitebsk.org/ URL: euravitebsk.org/news/148-expanded-clay.html.
 5. Onackij, S. P. Proizvodstvo keramzita [Production of expanded clay]. M.: Strojizdat, 1987. 405 p.
 6. Balterenas, P. S. Obespylivanie vozduha na predpriyatijah stroitel'nyh materialov [Dedusting air at enterprises of building materials]. M.: Strojizdat, 1990. 180 p.
 7. Sergina, N. M. Sistemy inercionnogo pyleulavlivanija v promyshlennosti stroitel'nyh materialov // Stroitel'nye materialy. 2013. №2. pp. 66-68.
 8. Sergina, N. M. Borovkov, D.P., Semenova, E.A.. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, vyp. 4 (№2). URL: ivdon.ru/ru/magazine /archive/n4p2y2012/1471.
 9. Sergina, N. M. Al'ternativnaja jenergetika i jekologija. 2013. №11. pp. 53-55.
 10. Sergina, N. M., Semenova, E. A., Kislenco, T. A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013. - Vyp. 4 (№4). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2013.
 11. Sergina, N. M., Azarov, D. V., Gladkov, E. V Stroitel'nye materialy. 2013. №2. pp. 86-88.
 12. Injushkin, N.V., Ermakov, S.A., Titov, A.G, Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2011. №4 (vyp. 4). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/524.
-

13. Nabil Kharoua, Lyes Khezzar, Zoubir Nemouchi. Study of the pressure drop and flow field in standard gas cyclone models using the granular model// International Journal of Chemical Engineering. Volume 2011 (2011), 11p.
 14. 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, №6, 2012, pp.37-42.
 15. Zhao B. Prediction of gas-particle separation efficiency for cyclones: A time-of-flight model //Separation and Purification Technology. – 2012. – Т. 85. – p. 171-177.
 16. Bardin-Monnier N. et al. Comparison of two methods of cyclones simulation: semi-empiric model and CFD. Example of a specific cyclone design //Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. – 2013. – Т. 8. – №. 1. – pp. 93-103.
 17. Li L. et al. Numerical Simulation of Three-phase Flow in the Scrubber for a Cascade-ring Foam Tower Using a Combined Euler-discrete Phase Model //Proceedings of the CSEE. – 2012. – Т. 5. – p. 012.
 18. 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. – Т. 59. – №. 6. – pp. 2168-2178.
 19. Lee B. K., Jung K. R., Park S. H. Development and application of a novel swirl cyclone scrubber—(1) Experimental //Journal of Aerosol Science. – 2008. – Т. 39. – №. 12. – pp. 1079-1088.HU S., Mcfarland A. R.
 20. Park S. H., Lee B. K. Development and application of a novel swirl cyclone scrubber:(2) Theoretical //Journal of hazardous materials. – 2009. – Т. 164. – №. 1. – pp. 315-321.
-



21. Li L. et al. Numerical Simulation of Three-phase Flow in the Scrubber for a Cascade-ring Foam Tower Using a Combined Euler-discrete Phase Model //Proceedings of the CSEE. – 2012. – Т. 5. – p. 012
22. Cortes C., Gil A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators //Progress in energy and combustion Science. – 2007. – Т. 33. – №. 5. – p. 409-452.
23. Patent №139122 Rossiya, MKI V 01 D 47/02. Ustrojstvo dlja ochistki gazov / Koshkarev, S.A., Azarov, V. N., Kislenko, T.A [i dr.]. Zajavka № 2013138200/05; Zajavleno 15.08.2013. Opubl. bjulleten' №10 10.04.2014.
24. Koshkarev, S.A., Kislenko, T.A. Al'ternativnaja jenergetika i jekologija. 2013. №11. pp. 47-49
25. Batrak, A. P. Planirovanie i organizacija jeksperimenta [Planning and organization of the experiment]. Krasnojarsk: IPC SFU, 2007. 60 p.
26. Ermakov, S. M. Matematicheskaja teorija optimal'nogo jeksperimenta. [Mathematical theory of optimal experiment] M.: Nauka, 2007. 320 p.
27. Dzhonson, N. Statistika i planirovanie jeksperimenta v tehnikе i nauke. Metody planirovanija jeksperimenta. Statistics and experimental design in engineering and science. Methods of experimental design]. M.: Mir, 1981. 520 p.