

УДК: 614.8.084

Результаты, полученные при внедрении электрофильтра в систему вентиляции комбикормового завода для предотвращения пылевых взрывов

*Д.А. Едимичев¹, к.т.н., доцент; А.Н. Минкин^{1,2} к.т.н., доцент;
С.Н. Масаев¹ к.т.н., доцент; Я.А. Тарасова¹*

¹ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет

²ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

Аннотация:

Работа посвящена вопросам эффективности использования техники электрической фильтрации и пылеудаления на пожаровзрывоопасных объектах, характеризующихся повышенным содержанием пыли и горючих волокон, на примере Красноярского комбикормового завода. В статье представлены результаты опытного применения электрофильтра в системе вентиляции комбикормового завода, доказывающие возможность его безопасного применения и высокую степень очистки запылённого воздуха, что позволит значительно снизить риск возникновения первичных и вторичных пылевых взрывов. Также в статье приводится описание устройства предлагаемого электрофильтра, позволяющего обеспечить процесс пылеудаления в пожаровзрывоопасных помещениях, отличающихся повышенной концентрацией в воздухе органической, мелкодисперсной пыли.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании электрофильтров, учитывая местные свойства улавливаемых пылей, их состав, дисперсность и производительность установленной вентиляционной системы. Полученные результаты также могут быть использованы при разработке методических рекомендаций, направленных на определение оптимальных режимов работы электрофильтров, инструкций по их безопасной эксплуатации.

Ключевые слова: Электрофильтр; пылеудаление; вентиляция; пыль; пылевые взрывы.

Цель работы: выявить оптимальные режимы работы электрофильтра при его работе в пожаровзрывоопасных зонах, характеризующихся повышенной концентрацией пыли.

Results obtained when introducing an electrofilter into the ventilation system of a feed mill to prevent dust explosions

D.A. Edimichev¹ Ph.D. of Engineering Sciences, docent; A.N. Minkin^{1,2} Ph.D. of Engineering Sciences, docent; S.N. Masaev¹ Ph.D. of Engineering Sciences, docent; Y.A. Tarasova¹

¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Siberian Federal University",

²FSBEI HE Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia.

Abstract:

The work is devoted to the issues of the efficiency of using electrical filtering and dust removal equipment at fire and explosion hazardous objects of high content of dust and combustible fibers, for example of the Krasnoyarsk feed mill. The article presents the results of the pilot application of an electrostatic precipitator in the ventilation system of a feed mill, proving the possibility of its safe use and a high degree of dusty air purification, which will

significantly reduce the risk of primary and secondary dust explosions. Also, the article provides a description of the device of the proposed electrostatic precipitator, which allows for the process of dust removal in fire-hazardous premises, characterized by an increased concentration of organic fine dust in the air.

The results of the work can be used in the design of electrostatic precipitators, taking into account the local properties of the captured dusts, their composition, dispersion, and performance of the installed ventilation system. Also, the results of experimental use can be used in the development of methodological recommendations aimed at determining the optimal operation modes of electrostatic precipitators, instructions for their safe operation.

Key words: Electrostatic precipitator; dust removal; ventilation; dust; dust explosions.

В различных отраслях экономики России функционирует свыше 8 тыс. взрывоопасных и пожароопасных объектов. Несмотря на пристальное внимание государственных надзорных органов, а также на хорошо организованную службу производственного контроля, на подобных объектах ежегодно фиксируются многочисленные случаи инцидентов и аварий. Зачастую аварии, сопровождаемые взрывами и пожарами. Также в последнее время отмечается тенденция к увеличению количества пожаров и загораний на объектах хранения и переработки растительного сырья, а именно на предприятиях, связанных с переработкой зерна, комбикормового сырья, на лесопромышленных комплексах [1].

Кроме того, зерновая пыль может вызвать острое общее заболевание организма человека – «зерновую лихорадку», выражающуюся ознобом, сильной головной болью, головокружением, болью в глазах, сердцебиением, тошнотой, кашлем, повышением температуры тела, одышкой; хронические заболевания верхних дыхательных путей – хронические риниты, фарингиты, бронхиты, пневмонии, изъязвление носовой перегородки. Зерновая пыль может также вызвать поражение кожи, которое получило название «зерновой чесотки». Установленная норма предельно-допустимой концентрации по содержанию зерновой пыли, выделяющейся в воздух предприятий, составляет 4 мг/м³ [2].

Все предприятия по хранению и переработке зерна составляют одну из стратегических отраслей нашей страны, в которой отмечается значительное увеличение производимой продукции, а вместе с тем и рост нагрузки на производственные мощности. В соответствии с требованием Федерального закона N 116 от 21.07.1997 приложение 1 (ред. от 29.07.2018) «О промышленной безопасности производственных объектов» производства, на которых хранится или перерабатывается растительное сырьё, в технологическом процессе образуются взрывоопасные пылевоздушные смеси, склонные к самовозгоранию и возгоранию от источника зажигания, а также осуществляется хранение зерна, продуктов его переработки и комбикормового сырья, способных к самонагреванию и самовозгоранию являются опасными производственными объектами, в связи с повышенной вероятностью возникновения пылевых взрывов, сопровождаемых значительными разрушениями зданий, сооружений и возможной гибелью людей [3].

Даже самая современная технология хранения и переработки зерна неизбежно приводит к образованию большого количества пылей. В свободных объёмах технологического, транспортного и аспирационного оборудования, в производственных сооружениях и помещениях постоянно возникают взрывоопасные концентрации пылевоздушных смесей, что обуславливается прежде всего такими особенностями производства как: открытое хранение сырья, негерметичность продукции и оборудования, наличие пневмотранспортеров, недостаточная эффективность системы пылеудаления и пылеулавливания [4,5].

Безопасность подобных объектов должна обеспечиваться прежде всего исключением возможности взрыва пылевоздушных смесей и предотвращением образования очагов самовозгорания зерна, продуктов его переработки, а в случае возникновения взрыва – предотвращением воздействия на персонал предприятия избыточного давления и других опасных факторов взрыва. [3,6].

На предприятиях где возможно образование горючих пылей или волокон обязательно должна быть внедрена система предотвращения взрыва в соответствии с приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору N 560 от 21 ноября 2013 г. (с изменениями на 15 ноября 2016 года).

В течение длительного времени техника пылеудаления значительно отставала от развития промышленности. Отмечалось несоответствие между оценкой важности проблемы и сложностью её решения. В дальнейшем социальная опасность загрязнения техногенной среды получила должную оценку, что способствовало проведению многих исследований и позволило создать множество необходимой техники и способов обеспыливания воздуха [4,7,8].

По процессам пылеудаления на предприятиях по переработке и хранению зерна уже проводились различные исследования, которые касались как повышения эффективности системы пылеудаления, так и разработки взрывозащиты отдельных элементов технологического цикла [9,10].

На рисунке 1 представлена теоретическая модель, описывающая процесс пылеудаления и пылеулавливания в производственном помещении. Описание работы системы пылеудаления, а именно определение расхода воздуха Q (м³/с), необходимого для удаления пыли, выделяемой в замкнутом помещении объёмом V (м³) в количестве A (г/ч), сводится к основному дифференциальному уравнению(1).

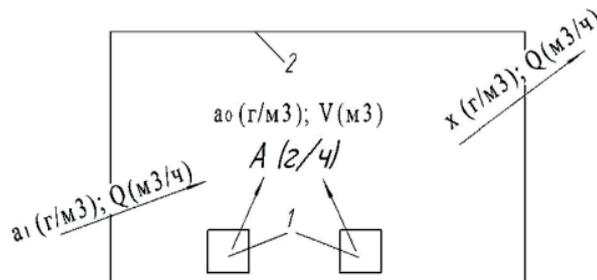


Рис. 1. Теоретическая модель пылеудаления, 1 – производственное оборудование выделяющие пыль, 2 – замкнутый объем производственного помещения.

Основное дифференциальное уравнение системы пылеудаления и пылеулавливания представлено в диссертации кандидата технических наук Едимичева Д.А. «Улучшение условий труда операторов зерноперерабатывающего оборудования совершенствованием технологии пылеудаления». [10].

В настоящее время на предприятиях по хранению и переработке зерна в качестве пылеуловителей широко используются центробежные пылеуловители-циклоны, принцип работы которых основан на использовании центробежных сил для выделения пыли из потока [5,8]. Циклоны получили широкое распространение благодаря простоте конструкции, низкой стоимости и относительно высокой эффективности работы. Однако коэффициент очистки обычных циклонов в пределах 80-90 % соответствует лишь для крупнодисперсной (более 100 мкм) пыли, преобладающей на предприятиях лесоперерабатывающего и лесохимического комплексов. На предприятиях по хранению и переработке зерна, комбикормового сырья преобладают, как правило, мелкодисперсные пыли, отличающиеся исключительной способностью образовывать взрывоопасные пылевоздушные смеси, даже при малых концентрациях [4,10]. Неспособность улавливать циклонами мелкодисперсную (менее 10 мкм) пыль обуславливается тем, что частицы средней и мелкой пыли не подчиняются закону Ньютона, осаждение пыли происходит по закону Стокса без ускорения с постоянной скоростью, вызывая вязкое сопротивление. При этом пыль, улавливаемая вместе с воздухом вытяжными зонтами из производственного помещения, пройдя через батарею циклонов, попадает обратно вместе с воздухом от приточной вентиляции, увеличивая концентрацию аэрозольной пыли до опасных значений, усугубляя и без того взрывоопасную обстановку. Особую опасность представляет режим рециркуляции воздуха, зачастую применяемый в холодный период года. Поэтому применение одних лишь циклонов в качестве пылеуловителей на пожаровзрывоопасных объектах, связанных с хранением и применением растительного сырья, не позволяет на многих производственных участках обеспечить снижение концентрации пыли до требуемых значений (менее 50 % от нижнего концентрационного предела распространения пламени по пылевоздушным смесям – далее НКПРП).

На зерноперерабатывающих предприятиях в качестве пылеуловителей, кроме циклонов также применяются тканевые (рукавные) фильтры, работа которых основана на пропуске запылённого воздуха через пористую ткань. Применение тканевых фильтров позволяет очищать запылённый воздух с эффективностью 85–95 %, однако это характерно лишь для крупнодисперсной пыли, так как при толщине самых тонких нитей в 500 мкм средняя и мелкодисперсная пыль достаточно легко проникает через пористую ткань. Кроме того, тканевые фильтры обладают повышенной пожаровзрывоопасностью из-за постоянного критичного скопления пыли. Также тканевые фильтры необходимо постоянно регенерировать, что существенно усложняет непрерывный процесс обеспыливания [8].

Проводившиеся ранее исследования в области пылеудаления доказали перспективность применения технологии улавливания пыли, основанной на технике высоких напряжений, т.е. с использованием электрофильтров [10]. Электрофильтры – это широко известные технические устройства, применяемые для очистки промышленных газов на предприятиях металлургической, химической, цементной промышленности, а также в тепловой энергетике. Возможность использования электрической фильтрации в системах вентиляции предприятий по хранению и переработке растительного сырья на сегодняшний день изучена слабо. К тому же сложность внедрения подобной технологии заключается в многообразии видов органических пылей, их различной дисперсностью, нестабильностью свойств.

Для снижения концентрации пыли на предприятиях, связанных с хранением и переработкой растительного сырья, была предложена и запатентована особая конструкция электрофильтров (рис. 2), позволяющая эффективно улавливать органическую мелкодисперсную пыль с учётом её особенностей и склонности к взрывам [11].

Разработанная конструкция электрофильтра может быть внедрена в уже существующую систему производственной вентиляции без демонтажа её отдельных элементов в т.ч. циклонов, что снизит риск возникновения пылевых взрывов без проведения значительной реконструкции технологического процесса.

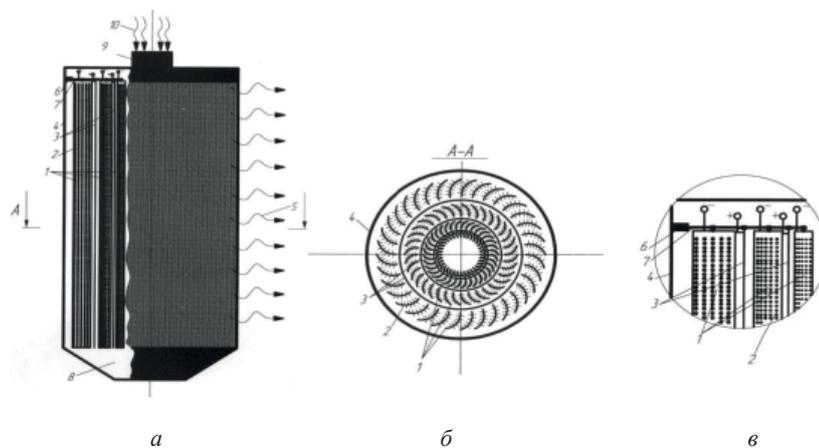


Рис. 2. Электрофильтр, а – общий вид электрофильтра, б – разрез А-А по рис. 2а, в – увеличенная область по рис. 2а

Электрофильтр содержит коронирующие электроды 1, выполненные в виде наборов медных, дугообразных пластин, с размещенными на них с двух противоположных сторон коронирующими иглами 2. Цилиндрические осадительные электроды 3 выполнены в форме металлической медной сетки. Осадительные электроды 3 расположены в корпусе радиально, поочередно. Коронирующие электроды 1 расположены в корпусе 4 послойно, с увеличением линейных размеров пластин по направлению к корпусу, чередующихся в направлении движения потока газа. Корпус 4 выполнен из пластиковой сетки, через которую выходит очищенный газ 5. Встряхиватель пыли 6 расположен в верхней части осадительных 3 и коронирующих 1 электродов и соединен с ними при помощи металлорукава 7. Пылесборочный бункер 8 расположен в нижней части электродов, а вводная шахта 9 расположена в верхней части электрофильтра, через которую и поступает запыленный газ 10.

Для обеспечения безопасной эксплуатации электрофильтра было предложено отказаться от работы на постоянном токе, а использовать импульсный ток отрицательной полярности, причём частота импульсов подбиралась таким образом, чтобы исключить любое проявление дугового или искрового разряда в межэлектродном пространстве. Кроме того, безопасность электрофильтра дополнительно обеспечивается наличием в схеме питания коронирующих электродов ограничителя тока, позволяющего исключить работу электрофильтра в небезопасных режимах, т.е. за пределами коронного разряда.

Как известно эффективность работы электрофильтра повышается с увеличением напряжения на коронирующих электродах. Однако повышение напряжения до критического значения приводит к образованию искрового, а затем и дугового разрядов, что недопустимо по соображениям пожаровзрывобезопасности. Безопасная работа электрофильтров, при которой исключается проявление искровых и дуговых разрядов обеспечивается ограничением тока в схемах питания.

Схема питания предлагаемого электрофильтра представлена на рис. 3. Высокое напряжение с повысительного трансформатора (ТП) подается на коронирующие электроды электрофильтра (Э) через блок селеновых выпрямителей ВС, собранных по двухтактной схеме, при этом уровень напряжения на коронирующих электродах фильтра автоматически регулируется главным магнитным усилителем (ГМУ), включённого в цепь первичной обмотки повысительного трансформатора (ТП). Регулирование тока главного магнитного усилителя осуществляется с помощью сглаживающих дросселей (ДС), выпрямителя цепи управления (ВУ), согласующего трансформатора (ТС) и промежуточного магнитного пускателя (ПМУ), включенного в цепь блока электронного регулятора (БЭР). Регулирование тока на коронирующих электродах электрофильтра осуществляется с помощью резистора РС, включённого в цепь промежуточного усилителя ПМУ.

Для регулирования тока был использован магнитный усилитель без обратной связи с совмещёнными обмотками. Напряжение распределяется между последовательно включенным магнитным усилителем и трансформатором в соответствии с величиной сопротивления нагрузки. В случае наступления искрового или дугового пробоя срабатывает автоматическая дифференциальная система, отключается подмагничивание магнитного усилителя, что вызывает значительное понижение напряжения на коронирующих электродах электрофильтра и, как следствие, гашение дуги или искры. После исчезновения дугового и искрового разрядов подмагничивание магнитного усилителя восстанавливается. Ток на коронирующих электродах будет несколько ниже того значения, которое было перед пробоем, затем ток плавно повышается. В случае возникновения устойчивого дугового разряда в электрофильтре система защиты через 0,4 с. отключит агрегат и включит аварийную сигнализацию.

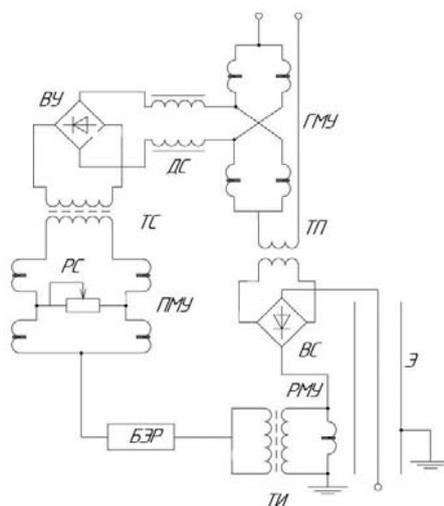


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема агрегата питания электрофильтра, ГМУ – главный магнитный усилитель, трансформатор повысительный, Э – электрофильтр, РМУ – релейный магнитный усилитель, ТИ – трансформатор импульсный, ПМУ – промежуточный магнитный усилитель, РС – резистор, ТС – трансформатор сигнальный, ВУ – выпрямитель цепи управления, ДС – дроссель.

В данной статье представлены результаты исследования, полученные во время опытного применения разработанного электрофильтра на Красноярском комбикормовом заводе. Опытное внедрение проводилось в уже существующую систему производственной вентиляции завода, с работающими в ней циклонами.

Целью опытного применения являлось определение оптимальных параметров работы электрофильтра (напряжение на электродах, частота импульсов, скорость воздушного потока) при которых электрофильтр показывает наибольшую эффективность работы.

При проведении эксперимента регистрировались следующие параметры работы электрофильтра:

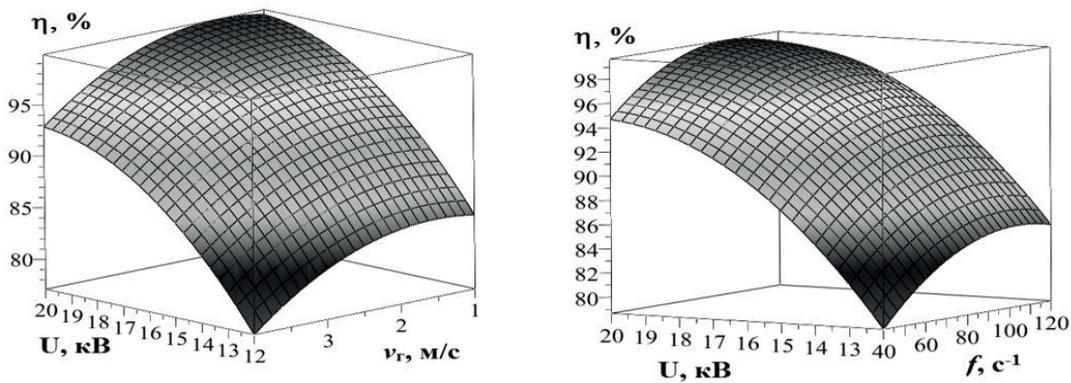
1. Концентрация пыли на входе воздушного потока в электрофильтр, мг/м^3 .
2. Концентрация пыли на выходе воздушного потока из электрофильтра, мг/м^3 .
3. Концентрация взвешенной аэрозольной пыли в производственном помещении при работающем электрофильтре, мг/м^3 .

4. Амплитудное значение импульса напряжения отрицательной полярности U , кВ.
5. Частота импульсов напряжения на коронирующих электродах f , c^{-1} .
6. Скорость воздушного потока, проходящего через электрофильтр, в его активном сечении, м/с.
7. Ток коронного разряда I , мА.
8. Эффективность работы электрофильтра, определяемая по формуле (4)

В ходе проведённого эксперимента и обработки экспериментальных данных была получена математическая модель, описывающая работу электрофильтра в условиях улавливания комбикормовой пыли мелкой дисперсии:

$$\eta = -7,5 + 9,01U + 0,35f + 2,8v_r - 0,0035Uf + 0,027Uv_r + 0,012fv_r - 0,22U^2 - 0,002f^2 - 1,3v_r^2 \quad (1)$$

По полученной математической модели (1) были построены поверхности функции отклика (рис. 4, рис. 5):



а

б

Рис. 4. Эффективность работы электрофильтра, а – при фиксированном значении частоты импульсов $f = 80 c^{-1}$; б – при фиксированном значении скорости воздушного потока в системе вентиляции $v_r = 2,5 м/с$.

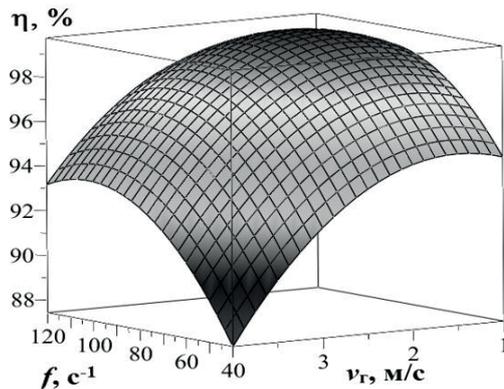


Рис. 5. Эффективность работы электрофильтра, при фиксированном значении напряжения на электродах $U = 20 кВ$

Дифференцированием полученных функций отклика по каждой переменной была составлена система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\eta}{df} = 0,349 - 0,0036U - 0,00323f + 0,0119v_r = 0; \\ \frac{d\eta}{dv_r} = 2,82 + 0,027U + 0,012f - 2,56v_r = 0; \\ \frac{d\eta}{dU} = 9,01 - 0,44U - 0,0036f + 0,027v_r = 0; \end{cases} \quad (2)$$

При решении системы дифференциальных уравнений (2) были определены следующие оптимальные параметры работы предлагаемого электрофильтра для улавливания комбикормовой пыли:

- Напряжение на коронирующих электродах: $U = 19,8$ кВ;
- Частота импульсов напряжения: $f = 89$ с⁻¹;
- Скорость воздушного потока в системе вентиляции при прохождении через электрофильтр: $= 1,8$ м/с.

Как показали результаты опытного внедрения, эксплуатация электрофильтра в существующей системе производственной вентиляции Красноярского комбикормового завода, позволяет при оптимальных параметрах его работы достичь эффективности очистки запылённого воздуха значения 98,5%. При этом, за всё время опытной эксплуатации электрофильтра уровень запылённости воздуха в цехе колебался в пределах 1,4-2,1 мг/м³, что не превышает значение НКПП (для комбикормовой пыли – 40 мг/м³). Во время исследования показания миллиамперметра (не более 0,6 мА) свидетельствовали об отсутствии дуговых и искровых пробоев в межэлектродном пространстве электрофильтра.

Результаты опытного применения доказывают, что внедрение техники электрической фильтрации на предприятиях по хранению и переработке растительного сырья позволит улучшить существующую технологию пылеудаления и впоследствии снизить риск возникновения пылевых взрывов.

Литература

1. Пожары и пожарная безопасность в 2018 году: Статистический сборник. Под общей редакцией Д.М. Гордиенко. – М.: ВНИИПО, 2019, – 125 с.
2. Справочник химика 21 Химия и химическая технология // [Электронный ресурс]; Официальный сайт Справочник химика 21 Химия и химическая технология. Режим доступа: <https://www.chem21.info/info/1370601/>
3. Приказ федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 21 ноября 2013 года № 560 об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности взрывопожароопасных производственных объектов хранения и переработки растительного сырья»
4. Полетаев Н.Л. Взрывоопасность пылей: дис. д-ра. техн. наук: 05.26.03. Москва, 1998. 245 с.
5. Веселов С.А. Вентиляционные и аспирационные установки предприятий хлебопродуктов. М.: КолосС, 2004. – 240 с.
6. СП 108.13330.2012. Свод правил «Предприятия, здания и сооружения по хранению и переработке зерна».
7. Швыдкий В.С. Очистка газов. М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.
8. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки. Пенза: Изд-во Пенз.гос.ун-та, 2005. – 210 с
9. Алшихина Л.А. Улучшение условий труда операторов агропромышленного комплекса при приготовлении комбикормов путем очистки воздуха рабочей зоны от мелкодисперсной пыли: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01. Орел, 2007. – 155 с.
10. Едимичев Д.А. Улучшение условий труда операторов зерноперерабатывающего оборудования совершенствованием технологии пылеудаления: дис. канд. техн. наук: 05.20.01. Красноярск, 2012. – 175 с.
11. Пат. 2383393 Российская Федерация, МПК В03С 3/06. Электрофильтр/ Едимичев Д.А. № 2008144413/12; заявл. 10.11.2008; опубл. 10.03.2010, Бюл. №7. –5 с.
12. Лавринович В.А. Техника высоких напряжений. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 134 с.