

СИСТЕМА СБРОСА АЗОТА В КАМЕРУ ЧИСТОГО ГАЗА РУКАВНЫХ И КАРТРИДЖНЫХ ФИЛЬТРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ткаченко А.С.

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург

Ключевые слова: аспирация, газоочистка, пылеподавление, система регенерации, загазованность рабочей зоны, горнодобывающая промышленность, металлургическая промышленность.

Аннотация. Аспирационные системы предназначены для удаления пыли из воздуха и ее последующего осаждения. Системы аспирации активно применяются на предприятиях горнодобывающей, металлургической и машиностроительной промышленности. В данной статье рассмотрена проблематика неорганизованных выбросов азота из клапанов импульсной системы регенерации рукавных и картриджных фильтров в шатровые укрытия данных фильтров. Серьезным источником опасности является выброс из системы регенерации и последующее накопление азота в шатровом укрытии, которое может привести к отравлению пребывающих там людей. Был проведен анализ текущей ситуации: исследование текущего состояния систем рукавных и картриджных фильтров, в системах регенерации которых используется чистый сжатый азот. Изучение нормативно-правовых актов, регулирующих работу данных систем. Проведена работа по поиску новой технологий и метода, которые могут быть использованы для модернизации системы регенерации рукавных и картриджных фильтров, сконструированных с шатровыми укрытиями над камерой чистого газа, с целью минимизации их вредного воздействия на окружающую среду и здоровье людей. Запущен процесс внедрения данной технологии для аспирационных и газоочистных систем, исходя из анализа текущей ситуации и исследования технологий, а также разработаны рекомендации по модернизации рукавных и картриджных фильтров и улучшению их работы в разрезе влияния на микроклимат внутри шатровых укрытий, где присутствует обслуживающий персонал. Произведена оценка эффективности предложенных рекомендаций: оценка предлагаемых путей модернизации систем аспирации и газоочистки с точки зрения, экологической безопасности и социальной приемлемости. Далее происходит внедрение предложенных рекомендаций и контроль над его реализацией.

NITROGEN DISCHARGE SYSTEM IN THE CLEAN GAS CHAMBER OF BAG AND CARTRIDGE FILTERS USED IN THE MINING INDUSTRY

Tkachenko A.S.

Ural State Mining University, Yekaterinburg

Keywords: aspiration, gas purification, dust suppression, regeneration system, gas contamination of the working area, mining industry, metallurgical industry.

Abstract. Aspiration systems are designed to remove dust from the air and its subsequent deposition. Aspiration systems are actively used in the mining, metallurgical and machine-building industries. This article discusses the problem of disorganized nitrogen emissions from the valves of the pulse regeneration system of bag and cartridge filters in the tent shelters of these filters. A serious source of danger is the release from the regeneration system and the subsequent accumulation of nitrogen in the tent shelter, which can lead to poisoning of people staying there. An analysis of the current situation was carried out: a study of the current state of bag and cartridge filter systems using pure compressed nitrogen in their regeneration systems. The study of regulatory legal acts regulating the operation of these systems. Work has been carried out to find new technologies and methods that can be used to modernize the regeneration system of bag and cartridge filters designed with tent shelters above the clean gas chamber in order to minimize their harmful effects on the environment and human health. The process of introducing this technology for aspiration and gas purification systems has been launched based on an analysis of the current situation and technology research, and recommendations have been developed for upgrading bag and cartridge filters and improving their performance in terms of the impact on the microclimate inside tent shelters where maintenance personnel are present. The effectiveness of the proposed recommendations was evaluated: evaluation of the proposed ways to modernize aspiration and gas purification systems in terms of environmental safety and social acceptability. Next, the proposed recommendations are implemented and their implementation is monitored.

Введение. Системы аспирации применяются на предприятиях горнодобывающей, металлургической и машиностроительной промышленности. На горнодобывающих предприятиях системы аспирации участвуют в процессах улавливания мелкодисперсной пыли на дробильно-сортировочных и перегрузочных комплексах, где происходит наиболее интенсивное образование пыли. В системах регенерации фильтровальных элементов рукавных и картриджных фильтров, исходя из различных причин, используется сжатый азот в качестве газовой среды для осуществления регенерации, такими причинами могут быть:

- воспламеняемость аспирируемой и очищаемой среды вследствие контакта с кислородом воздуха, например: при фильтрации колошниковых газов доменных печей;
- наличие избыточного количества сжатого азота на предприятии и одновременно дефицит сжатого воздуха.

Данный азот, направляясь в продувочный коллектор системы регенерации, проходит через мембранный клапан, в котором всегда, помимо отверстий входа и выхода сжатого газа, присутствует отверстие для сброса небольшого количества свободного газа, на котором, как правило, установлен глушитель из спеченной бронзы или латуни. Это отверстие служит для удаления излишков газа, который не может выйти через систему трубопроводов соленоидного пилотного клапана, инициирующего открытие мембраны мембранного клапана. Без данного отверстия невозможно достичь нужной скорости быстрого действия мембраны и соответственно импульса системы регенерации, иными словами, физического времени длительности цикла открытия-закрытия клапана.

Зачастую над камерами чистого газа рукавных и картриджных фильтров устанавливают так называемое шатровое укрытие для удобства эксплуатации фильтров в зимнее время и для защиты от отсадков для удобства обслуживающего персонала. В таких шатрах на практике не всегда присутствует приточно-вытяжная система вентиляции, так как там нет постоянных рабочих мест и не всегда они оснащены системами газоанализаторной аппаратуры, соответственно накопившийся за длительное время азот, выделяющийся при каждом импульсе системы регенерации в данном шатровом укрытии, может привести к отравлению обслуживающего персонала во время нахождения внутри шатра.

Если доля азота в воздухе шатра увеличивается в случае направления в закрытое помещение, его парциальное давление увеличивается. Поскольку общее давление остается постоянным, парциальное давление других газов, включая кислород, должно уменьшаться. Это приводит к уменьшению относительной доли кислорода в смеси. Увеличение уровня азота может снизить уровень кислорода ниже жизненно важного уровня, что приведет к гипоксии. Эта ситуация опасна, поскольку азот нетоксичен и не вызывает немедленных симптомов, таких как одышка. В таких условиях критический дефицит кислорода может возникнуть незаметно, что представляет серьезную опасность для здоровья и жизни.

Ниже перечислены основные факторы, влияющие на принятие решения о необходимости модернизации рукавных и картриджных фильтров и дооснащения их системами перенаправления азота из системы регенерации в камеру чистого газа рукавного фильтра:

- наличие шатрового укрытия в рукавном или картриджном фильтре;
- отсутствие системы приточно-вытяжной вентиляции в шатровом укрытии;
- отсутствие газоанализаторов в шатровом укрытии.

Практическая реализация. Для решения поставленной задачи необходимо соединить трубопроводом отверстие в средней части мембранного клапана и свободный выход газа из соленоидных «инициирующих» клапанов (рис. 1), из которого выбрасывается излишек газа с камерой чистого газа фильтра, находящейся под разрежением, тем самым мы обеспечим организованный сбор данного газа и удаление его не в шатровое укрытие фильтра, а в камеру чистого газа.

Однако при реализации данного решения возникает научная подзадача модернизации мембранного клапана, так как эмпирически было установлено, что установка трубопроводов в систему сброса «свободного» газа приводит к росту сопротивления на выходе свободного газа, и мембранный клапан начинает некорректную работу в разрезе физического быстрого действия

мембраны, иными словами, должной силы импульса не вырабатывается, и фильтровальные элементы внутри аспирационной или газоочистной установки остаются не регенерированными. Самым доступным и простым методом решения данной задачи является модернизация или замена эластичной мембраны клапана. При эмпирическом эксперименте в клапане стояла стандартная мембрана с двумя перепускными отверстиями диаметром 2 мм каждое.

В этой связи нашу научную подзадачу можно обозначить как определение оптимального количества и диаметра перепускных отверстий в мембранном клапане системы регенерации аспирационных систем (рис. 2).



Рис. 1. «Взрыв-схема» мембранного клапана системы регенерации



Рис. 2. Рукавный фильтр Аспекс и ресивер системы регенерации, оснащенный системой организованного сбора «свободного» азота в камеру чистого газа на промплощадке ПАО «НЛМК»

Для решения данной задачи проведем расчет в 3D-постановке методом конечных объемов с использованием программного продукта ANSYS Fluent.

Исходная геометрия моделей подготовлена для расчета с помощью встроенного CAD-пакета ANSYS SpaceClaim. В ходе подготовки из модели были удалены элементы, слабо влияющие на конечный результат (рис. 3) аэродинамического расчета (например, мелкие фаски, резьбы и т.д.). Далее формируется область течения газа, представляющая собой внутренний объем клапанов.

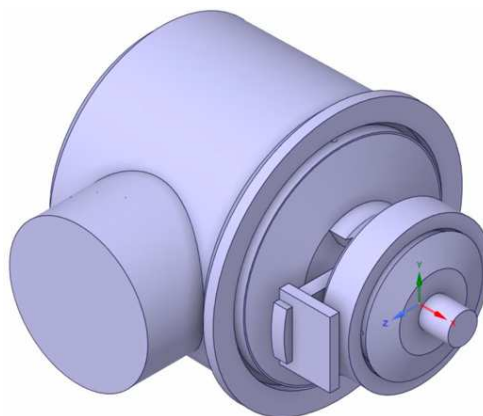


Рис. 3. Общий вид расчетной модели клапана

Далее необходимо выполнить разбиение расчётных моделей на конечные элементы. На рисунке 4 представлена сеточная модель клапана. Сетка состоит из элементов полиэдрической формы со сгущениями вблизи мелких особенностей геометрии и 10-ю призматическими слоями вблизи стенок конструкции. Полиэдрический тип элемента позволяет получить необходимое для корректного расчета качество сетки при сравнительно

небольшом количестве элементов. Качество сетки оценивается по показателю Minimum Orthogonal Quality (минимальное ортогональное качество). Значение показателя оказалось равным 0,18, что соответствует хорошему качеству сеточной модели.

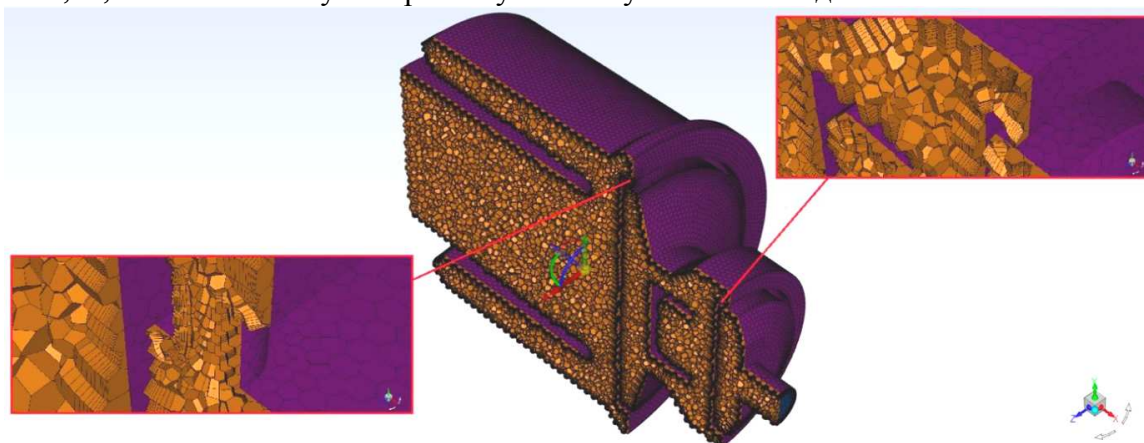


Рис. 4. Сеточная модель клапана

Решение поставленной задачи разделено на несколько этапов, включающих в себя определение основных параметров расчета, физических моделей и граничных условий.

1. Основные параметры расчета.

Тип расчета – Steady (стационарный, параметры потока неизменны во времени).

Рабочее давление – 0 Па (т.к. перепад давлений достаточно большой, все значения давлений для граничных условий указываются относительно нулевого значения).

2. Модели материалов.

Для плотности воздуха используется модель идеального газа – Ideal gas, применяется уравнение состояния:

$$\rho V = nRT, \quad (1)$$

где ρ – давление; V – объем газа; n – количество вещества в молях; R – универсальная газовая постоянная; $R \approx 8,314$ Дж/(моль·К); T – термодинамическая температура, К.

В приведенном выше уравнении плотность является функцией давления и температуры.

3. Физические модели.

Модель турбулентности $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) или $k-\omega$ модель Ментера демонстрирует хорошую сходимость и точность результатов для широкого спектра инженерных задач, т.к. корректно учитывает явления в пограничном слое и ядре потока.

Модели типа $k-\omega$ обеспечивают корректное описание пристенной турбулентности, восприимчивы к граничным условиям во внешнем потоке, в большей части пограничного слоя касательное напряжение пропорционально кинетической энергии турбулентности.

Модель теплообмена (т.к. плотность воздуха задавалась по закону идеального газа) может быть выражена следующим уравнением:

$$\rho_0 = R_B + \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_H, \quad (2)$$

где R_B – термическое сопротивление тепловосприятию внутренней поверхности преграды; R_H – термическое сопротивление теплоотдаче наружной поверхности преграды; m – количество преграждающих слоев; δ_i – толщина i -го слоя; λ_i – коэффициент теплопроводности материала i -го слоя.

4. Граничные условия.

Условие на выходных границах – избыточное статическое давление на выходе: значение давления принято равным атмосферному минус разрежение фильтра

$$P_B = P_a - P_{кчг}, \quad (3)$$

где P_B – давление на выходе; P_a – давление атмосферное; $P_{кчг}$ – давление (разряжение) в камере чистого газа рукавного фильтра.

Согласно формуле (3), избыточное статическое давление на выходе равно:

$$P_B = 101325 \text{ Па} - 2000 \text{ Па} = 99325 \text{ Па}.$$

Для определения значения объема газа, поступившего в выходное сечение, использовалось значение объемного расхода через данное сечение, для этого значение расхода умножалось на время открытия клапана (70 мс).

Размеры отверстий в мембранах, для которых проводился расчет, и соответствующие величины объемов приведены в таблице 1.

Табл. 1 Размеры перепускных отверстий в мембранах и расход газа

№	Количество перепускных отверстий	Диаметр, перепускового отверстия, мм	Объем азота, л (при рассчитанной плотности азота на выходе $2,43 \text{ кг/м}^3$)	Объем азота, л (плотность азота для н.у. $1,17 \text{ кг/м}^3$)	Сечение на выходе из клапана
1	1	1,85	59,9	124,4	2"
2	1	2	59,7	124,0	2"
3	2	1,85	45,3	94,1	2"
4	2	2	45,1	93,7	2"

На основании данных, представленных в таблице 1, можно сделать вывод, что объем газа на выходе из клапана регенерации при рабочем импульсе недостаточен при увеличении общего диаметра перепускного отверстия в мембране, однако, одновременно с этим мы видим, что полученные данные отличаются в меньшую сторону от паспортных значений работы данных клапанов, а именно 145 л свободного газа на выходе из клапана, поэтому для получения точных значений нам необходимо провести дополнительные расчеты, объединив механическую и гидродинамическую части стоящей перед данной научной работой задачи, обеспечив точное описание поведения мембран под действием перепада давления. Связанный расчет включает в себя одновременное решение уравнений механики деформируемого тела и гидродинамики, что позволяет учитывать взаимодействие потока газа с мембраной в реальном времени [1-3].

Так же, как и в предыдущем расчете для моделирования будет использована модель турбулентности $k-\omega$ SST, а для учета физических свойств азота – модель гравитации и модель идеального газа.

Для связанного расчета механики и гидродинамики был выбран временной шаг $t = 0,00001 \text{ с}$. Такой малый шаг был необходим для обеспечения численной устойчивости и точности решения, особенно в условиях сильной деформации мембраны и быстрого изменения параметров потока газа.

На рисунке 5 представлена подготовленная геометрия расчетной области, включающая деформированные формы мембран [4, 5], полученные в ходе расчетов, в которую входит:

- область потока газа, ограниченную стенками клапана и мембраной;
- исходная форма мембраны, соответствующая начальному состоянию до приложения перепада давления;
- деформированная мембрана, отражающая ее конечное положение под действием перепада давления.

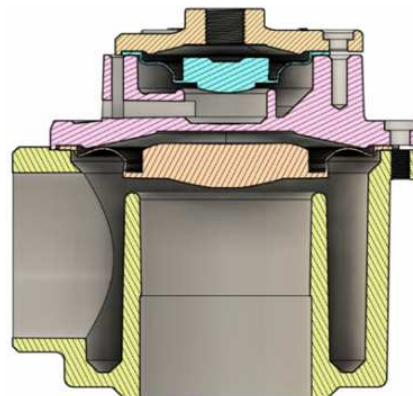


Рис. 5. Схема установки мембран в клапане

Для расчета были выбраны два типа мембран с различными механическими свойствами, характеризующимися модулями Юнга, равными 350 МПа и 200 МПа. Коэффициент Пуассона был задан равным 0,49, что является максимальным значением для термопластичных эластомеров, из которых сделаны мембраны. Такой выбор обеспечивает высокую упругость материала [6, 7].

Коэффициенты Пуассона ниже этого значения приводят к чрезмерным деформациям мембраны в дополнительных направлениях, что делает ее мягче и снижает функциональные характеристики, а именно срок службы мембран.

Плотность мембраны была принята равной 1210 кг/м^3 в соответствии с паспортными данными имеющихся мембран [8].

На рисунках 6, 7 представлены контуры распределения скоростей в расчетной области.

Максимальная скорость газа наблюдается в центре ядра потока – на выходе из клапана, где поток достигает наибольшей интенсивности и в зонах отверстий большой мембраны, где газ проходит через узкие участки, увеличивая свою скорость до сверхзвуковых значений из-за эффекта сужения, именно из-за данного эффекта наблюдается характерный «стреляющий» звук работы мембранного клапана [9, 10].

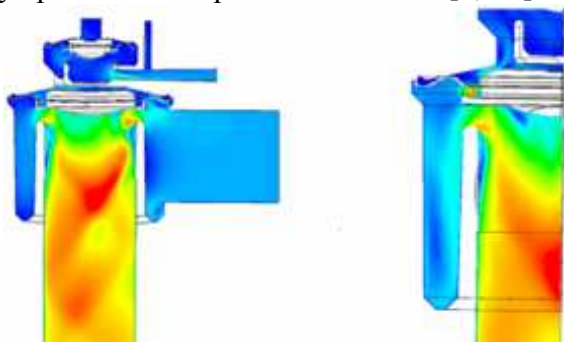


Рис. 6. Контуры распределения скоростей

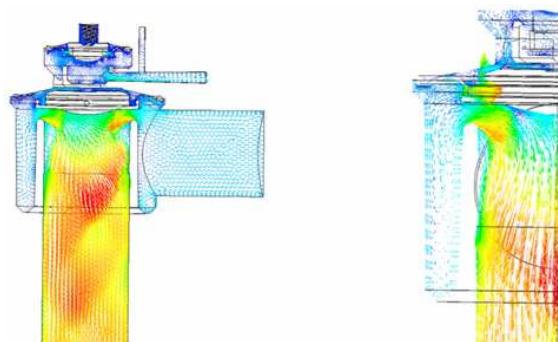


Рис. 7. Векторы распределения скоростей

На рисунке 8 представлены результаты моделирования деформации мембраны под воздействием перепада давления. Максимальная деформация мембраны составляет 8,7 мм, что соответствует рабочим условиям и подтверждает стабильность ее работы [11, 12].

Область максимальной деформации наблюдается у основания конуса мембраны, в местах прогиба, где давление оказывает наибольшее влияние. Зоны минимальной деформации расположены ближе к краям мембраны, где деформацию ограничивают фиксированные опоры. Максимальные напряжения наблюдаются в зонах сгиба мембраны и составляют 111,4 МПа (рис. 9). Полученные данные подтверждают, что мембрана работает в пределах допустимых механических характеристик, обеспечивая стабильное выполнение своих функций.

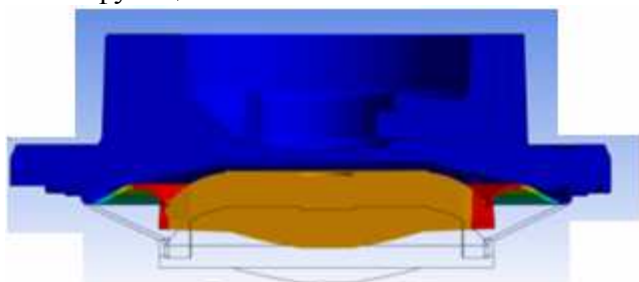


Рис. 8. Деформация мембраны

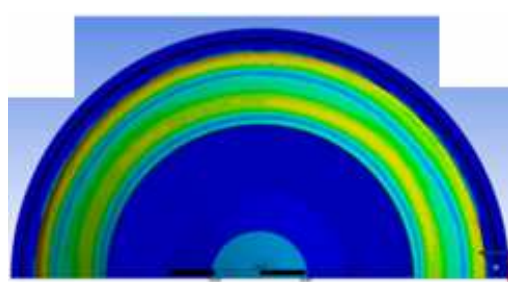


Рис. 9. Распределение напряжения мембраны

По результатам расчета мембран с модулем Юнга 350 и 200 МПа установлено, что уменьшение диаметра отверстия приводит к увеличению перепада давления. Наиболее эффективными оказались мембраны с одним отверстием диаметром 1,85 мм и 2 мм. Это объясняется тем, что меньший диаметр отверстия ограничивает расход среды через мембрану, что способствует созданию большего перепада давления между верхней и нижней сторонами мембраны. В таблице 2 представлены значения расходов для каждого варианта мембран с различными параметрами [12-14].

По результатам расчёта мембран с различными диаметрами и количеством перепускных отверстий установлено, что уменьшение диаметра отверстия, а также сокращение их числа (с двух до одного) ведет к увеличению перепада давления ($\sim 0,6 \text{ МПа}$).

Табл. 2 Размеры перепускных отверстий в мембранах и расход газа

№	Диаметр, перепускного. отверстия при одном отверстии в мембране, мм	Расход газа на входе, кг/с	Расход газа на выходе, кг/с	Объем азота, л (плотность азота для н.у. – 1,17 кг/м³)	Сечение на выходе из клапана
1	1,85	2,465	2,461	147,17	2“
2	2	2,456	2,451	146,64	2“
3	2,8	2,391	2,385	142,69	2“
4	3,25	2,372	2,370	141,79	2“

Наибольшую эффективность продемонстрировали мембраны с одним отверстием диаметром 1,85 мм и 2 мм. Это связано с тем, что меньший диаметр отверстия существенно ограничивает расход среды через мембрану, что, в свою очередь, способствует увеличению перепада давления между верхней и нижней сторонами мембраны и обеспечивает более стабильную работу без значительных колебаний. Мембраны с двумя отверстиями диаметром 2 и 3,25 мм показали худшие результаты при расчетах, поскольку расход газа через них значительно увеличился, что привело к снижению перепада давления между сторонами (~ 0,45 МПа). Кроме того, повышенный расход через мембрану вызвал значительные колебания её положения при цикле открытие-закрытие. Изначально мембрана открывалась из-за большого перепада давления, затем, по мере прохождения газа через отверстия, перепад уменьшался, что приводило к частичному закрытию мембраны. Впоследствии давление снова возрастало, что снова инициировало её открытие, и процесс повторялся циклично. Эти колебания снижали общий расход газа через клапан и силу импульса регенерации:

$$V_n = \frac{G \cdot t}{\rho} \quad (4)$$

где $\rho = 1,17 \text{ кг/м}^3$ – плотность для азота при нормальных условиях; G – полученный массовый расход, кг/с; $t = 0,07 \text{ с}$ – время работы клапана.

Полученный положительный эффект, на примере модернизации системы регенерации с использованием сжатого азота, в качестве рабочего газа, рукавного фильтра Aspex, на участке аспирации аппарата печь-ковш №3, ПАО «НЛМК», можно оценить следующим образом.

Исходные данные до модернизации:

- загазованность шатрового укрытия сжатым азотом во время активной пуско-наладки по данным газоанализаторов АНКAT составляет до 80-81 %об. воздуха (табл. 3).
- объём выбрасываемого азота в зону шатрового укрытия: 20-21 м³, исходя из паспортного значения 1,4 литра газа, клапан выбрасывает в свободное пространство за один импульс системы регенерации, все 128 мембранных клапанов, установленных на данном фильтре Aspex, совершают каждый час один импульс.

После модернизации системы регенерации рукавного фильтра Aspex, системой направления «свободного» азота в камеру чистого газа фильтра, на участке аспирации аппарата печь-ковш № 3, ПАО «НЛМК» были получены следующие данные:

- загазованность шатрового укрытия сжатым азотом во время активной пуско-наладки по данным газоанализаторов АНКAT: до 78,1 % об. воздуха, загазованность практически отсутствует (табл. 3) [15].

Табл. 3. Содержание азота в воздухе шатрового укрытия до и после модернизации

Наименование пробы в течение дня недели, начиная с понедельника по пятницу, среднее значение	Содержание, %				
	1	2	3	4	5
N2 (до модернизации)	79,9	80,2	80,9	81,0	80,65
N2 (после модернизации)	78,1	78,0	78,0	78,0	78,0

Заключение. В результате модернизации системы регенерации рукавного фильтра Asprex на предприятии ПАО «НЛМК» системой направления свободного сжатого азота в камеру чистого газа значительно улучшились условия труда работников цеха, обслуживающих фильтр в шатровом укрытии, уровень загазованности азотом воздуха в шатровом укрытии фильтра пришел к нулевому значению, т.е. нормального состава воздушной смеси, без необходимости в дополнительно принудительной вентиляции шатрового укрытия и факторов, связанных с надежностью и работоспособностью данной системы вентиляции, удалось значительно улучшить условия труда работников предприятия и состояние воздушного бассейна в районе шатрового укрытия фильтра. Так, уровень содержания азота в воздухе укрытия сократился с 81% до 78% в рабочих зонах шатра фильтра. Необходимость несения энергозатрат и трудовых затрат на вентиляцию шатра отсутствует, риск нанесения урона состоянию здоровья специалистов от отравления азотом отсутствует.

Список литературы

1. Баранов В.Е., Борискина И.П., Мартынов С.И. Осаждение большого числа частиц в вязкой жидкости // Тезисы докладов Международной летней научной школы «Гидродинамика больших скоростей 2002». – Чебоксары: Изд-во Чувашского университета. – С. 34-35.
2. Лиманова Н.И., Мамзин Е.А., Матвеев С.Г. Моделирование процессов теплообмена // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2009. – № 3 (19). – С. 265-269.
3. Голубев А.Г., Ремизова О.И. Моделирование сверхзвукового обтекания затупленного конуса в пакете ANSYS Fluent с использованием двух раз личных способов построения расчетной сетки // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – №11. – С. 1-14. – DOI: 10.18698/2308-6033-2018-11-1821.
4. Прицепова С.А. Распознавание опасности вредного воздействия // Труды международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» («ТрансПромЭк – 2019»). – Воронеж: Филиал РГУПС, 2019. – С. 74-81.
5. Соболев И.С. CFD-моделирование процесса истечения идеального газа из сопла Лавалля в программном продукте ANSYS Fluent // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2016. – №12(94). – С. 344-348.
6. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н., Есеновский-Лашков М.Ю. Мокрая очистка воздуха от пыли в инновационной орошаемой насадке регулярной структуры для вентиляции кабин колесных и гусеничных машин // Известия МГТУ МАМИ. – 2015. – Т. 1, №3(25). – С. 85-93.
7. Миличева Н.Н., Саблина А.М. Наилучшие доступные технологии снижения выбросов пыли в атмосферный воздух, применимые в различных отраслях промышленности // Инженерный вестник Дона – 2018. – №4. – URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5300>.
8. Боровков Д.П., Батманов В.П., Богомолов С.А., Бурлаченко О.В. О выборе схем обеспыливания и вентиляции, предназначенных для очистки воздуха рабочей зоны от известковой пыли при погрузочно-разгрузочных работах // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2017. – № 47(66). – С. 320-327.
9. Василевский М.В., Зыков Е.Г., Разва А.С., Логинов В.С. Обеспыливание воздуха циклонами в аспирационных сетях // Безопасность жизнедеятельности. – 2008. – №2(86). – С. 1-6.
10. Василевский М.В., Зыков Е.Г. Методы повышения эффективности систем обеспыливания газов с групповыми циклонными аппаратами в малой энергетике // Промышленная энергетика. – 2004. – № 9. – С. 54-57.
11. Мантула В.Д., Минко А.Н. Исследование аэродинамического состояния газоотводящего тракта вращающейся печи известково-доломитного цеха // Экология и промышленность. – 2016. – № 2(47). – С. 25-31.
12. Романюк Е.В., Федоров А.В. Особенности возникновения и предупреждение взрывоопасных режимов в системах аспирации с фильтрами-пылеуловителями // Пожарная безопасность. – 2020. – №1(98). – С. 89-96. – DOI: 10.37657/vniipo.2020.98.1.010.
13. Романюк Е.В., Воронов С.П., Власов А.Г. Проверка работоспособности и пожарной безопасности производственных систем аспирации пылевыведяющих производств // Современные проблемы гражданской защиты. – 2023. – №2(47). – С. 114-124.
14. Зленко Ю.И., Куц Е.В. Исследование эффективности аспирации в промышленном производстве // Студенческий вестник. – 2024. – №44-16(330). – С. 27-30.
15. Овсянников Ю.Г., Агарков А.М. Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик системы аспирации с принудительной рециркуляцией // Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. – Т. 2. – С. 166-169.

References

1. Baranov V.E., Boriskina I.P., Martynov S.I. Sedimentation of a large number of particles in a viscous fluid // Proceedings of the International Summer Scientific School «High-Speed Hydrodynamics 2002». – Cheboksary: Chuvash University Press, 2002. – P. 34-35.
2. Limanova N.I., Mamzin E.A., Matveev S.G. Modeling of heat transfer processes // Bulletin of Samara University. Aerospace Engineering, Technologies and Mechanical Engineering. 2009, no. 3(19), pp. 265-269.
3. Golubev A.G., Remizova O.I. Modeling of supersonic flow around a blunt cone in ANSYS Fluent using two different mesh generation methods // Engineering Journal: Science and Innovation. 2018, vol. 11(83), pp. 1-14. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-11-1821.
4. Pritsepova S.A. Recognition of hazardous exposure // Proceedings of the International Scientific-Practical Conference «Current Problems and Development Prospects of Transport, Industry and Economy of Russia» («TransPromEk-2019»). – Voronezh: Branch of RSTU, 2019. – P. 74-81.
5. Sobolev I.S. CFD modeling of ideal gas flow through a Laval nozzle in ANSYS Fluent software // Mathematical Methods in Engineering and Technologies – MMTT. 2016, no. 12(94), pp. 344-348.
6. Mikhailov V.A., Sharipova N.N., Esenovskiy-Lashkov M.Y. Wet cleaning of air from dust using innovative irrigated regular structure packing for ventilation of wheeled and tracked vehicle cabins // News of MSTU «MAMI». 2015, vol. 1, no. 3(25), pp. 85-93.
7. Milicheva N.N., Sablina A.M. Best available technologies for reducing dust emissions into atmospheric air, applicable in various industries // Engineering Bulletin of Don. 2018, no. 4. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5300>.
8. Borovkov D.P., Batmanov V.P., Bogomolov S.A., Burlachenko O.V. On the choice of dedusting and ventilation schemes for cleaning the working area air from lime dust during loading operations // Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2017, no. 47(66), pp. 320-327.
9. Vasilevsky M.V., Zykov E.G., Razva A.S., Loginov V.S. Air dedusting by cyclones in aspiration networks // Life Safety. 2008, no. 2(86), pp. 1-6.
10. Vasilevsky M.V., Zykov E.G. Methods for improving the efficiency of gas dedusting systems with grouped cyclone units in small-scale power engineering // Industrial Power Engineering. 2004, no. 9, pp. 54-57.
11. Mantula V.D., Minko A.N. Study of aerodynamic conditions of gas ducts in rotary kilns of lime-dolomite shops // Ecology and Industry. 2016, no. 2(47), pp. 25-31.
12. Romanyuk E.V., Fedorov A.V. Features of occurrence and prevention of explosive conditions in aspiration systems with dust filters // Fire Safety. 2020, no. 1(98), pp. 89-96. DOI: 10.37657/vniipo.2020.98.1.010.
13. Romanyuk E.V., Voronov S.P., Vlasov A.G. Performance and fire safety testing of industrial aspiration systems at dust-generating facilities // Modern Problems of Civil Protection. 2023, no. 2(47), pp. 114-124.
14. Zlenko Yu.I., Kuts E.V. Study of aspiration efficiency in industrial production // Student Bulletin. 2024, no. 44-16(330), pp. 27-30.
15. Ovsyannikov Yu.G., Agarkov A.M. Experimental studies of aerodynamic characteristics of an aspiration system with forced recirculation // Innovative Materials, Technologies and Equipment for Construction of Modern Transport Facilities. – Belgorod: BSTU n.a. V.G. Shukhov, 2013. – Vol. 2. – P. 166-169.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Ткаченко Артем Сергеевич – аспирант	Tkachenko Artem Sergeevich – postgraduate student
a@aspex.ru	

Получена 05.02.2025