

УДК 628.53

**АНАЛИЗ ВЫБРОСОВ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЙ КОТЕЛЬНОЙ
СТ. БИРОБИДЖАН-1 И РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ИХ СНИЖЕНИЮ**© 2025 А.А. Журавлев¹, В.Д. Катин^{1,2}¹ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Россия² Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

Статья поступила в редакцию 17.03.2025

В данной статье представлены результаты исследования выбросов твердых частиц из блочно-модульной котельной станции Биробиджан-1 ОАО «РЖД», работающей на твердом топливе (уголь). Использовался лазерный пылеизмеритель ЛПИ-05-Т для определения массовой концентрации твердых частиц в выхлопных газах циклонного аппарата ЦН-15. Анализ полученных данных проведен с учетом метеорологических условий и режима работы котельной. Предложены мероприятия и технические решения по снижению негативного воздействия работы котельной.

Ключевые слова: блочно-модульная котельная, твердое топливо, угольное топливо, выбросы, твердые частицы, зола и сажа, ЦН-15, экологический мониторинг.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-2-180-186

EDN: IRVZWC

ВВЕДЕНИЕ

ОАО «РЖД» уделяет значительное внимание вопросам охраны окружающей среды, об этом свидетельствует утвержденная Экологическая стратегия ОАО «Российские железные дороги» до 2030 и на перспективу до 2035 года. Эффективное функционирование котельных на железнодорожных станциях – важная часть этой задачи. Так на территории России действуют Федеральные законы «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» и «Об охране окружающей среды», которые устанавливают правовые основы для регулирования выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, включая твердые частицы, которые представлены в дымовых выбросах котельных в виде золы и сажи.

В работе [1] произведен расчет выбросов котельных, где был установлен золоуловитель с эффективностью очистки 80%, по следующим загрязнителям: оксид углерода, оксид и диоксид азота, диоксид серы, бенз(а)пирен, сажа (количество коксовых остатков). По результатам проведенного исследования было установлено, что основное количество вредных выбросов попадает в атмосферный воздух в зимний период, около 85%, а в летний период 15% от общего количества выбросов, где на сажу приходится 58% всех выбросов в зимний период и летний период.

Настоящее исследование посвящено оценке уровня выбросов твердых частиц из блочно-модульной котельной станции Биробиджан-1, оснащенной котлом Прометей 800М, работающим на угле. Данный котел обеспечивает теплом помещения до 15400м³. В котле используется способ нижнего горения, т.е. уголь горит на колосниках слоем толщиной 10-15 см, а воздух для горения поступает с четырех точек: для горения топлива - с торца колосников и под колосники, для дожигания газов - снизу вверх вдоль среднего плоского теплообменника, а также через боковые заслонки котла.

Цель работы – определить массовую концентрацию твердых частиц в выхлопных газах и проанализировать влияние метеорологических факторов на этот показатель, разработать мероприятия по снижению выбросов твердых частиц.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Отопительный сезон 2024/2025 в городе Биробиджан начался в первой декаде октября, где проводились замеры концентрации твердых частиц, выбрасываемых из циклонных аппаратов типа ЦН-15.

Александр Александрович Журавлев, аспирант кафедры «Техносферная безопасность». E-mail: goposor@yandex.ru
Катин Виктор Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техносферная безопасность». E-mail: bgd@festu.khv.ru

Для этих целей был установлен и откалиброван лазерный пылеизмеритель модели ЛПИ-05-Т, размещенный на выходе из выхлопной трубы. Принцип действия данного пылемера основан на количественном анализе затухания лазерного излучения, которое проходит через систему, содержащую твердые частицы в газовой среде. Затухание света обусловлено процессами поглощения и рассеяния, что позволяет определить концентрацию твердых частиц, измеряемую в граммах на кубический метр (г/м^3). Схема устройства включает в себя излучающий модуль, установленный с одной стороны газохода, и блок приема, располагающийся напротив. Внутри газохода предусмотрены два отверстия: одно для входа лазерного излучения, а другое — для его выхода, который соединяется с фотоприемником на приемном блоке. Кроме того, в излучающем модуле имеется фотоприемник для контроля начальной мощности лазерного излучения. Сигналы, полученные от фотоприемников, обрабатываются в процессорном узле, где по заданному алгоритму производится расчет концентрации пыли в газоходе. Метрологические и технические характеристики ЛПИ-05-Т приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Метрологические и технические характеристики ЛПИ-05-Т

Наименование параметра	Показатель
Диапазон измерений массовой концентрации пыли, г/м^3	0,020-10,0
Пределы допускаемой относительной погрешности, %	± 2
Диапазон измерений спектрального коэффициента направленного пропускания, %	0,5-95
Пределы допускаемой приведенной погрешности спектрального коэффициента направленного пропускания, %	± 2
Диапазон температуры окружающей среды	-20°C...+160°C
Диапазон относительной влажности	Не более 80% при 20°C

Замеры концентраций твердых частиц проводились на протяжении девяти дней, начиная с 10 октября. Основное внимание уделялось первой выхлопной трубе циклона ЦН-15, поскольку именно здесь наблюдается наивысшая концентрация твердых частиц, что обеспечивает максимальную чувствительность результатов измерений. Высота, на которой осуществлялся отбор проб, составляла 20 см от конца данной выхлопной трубы.

Отбор проб выполнялся в сотрудничестве с сотрудниками экологической службы в рамках производственного экологического контроля. Фиксация проб проводилась в пяти временных интервалах: с 06:00 до 07:00, с 09:00 до 10:00, с 12:00 до 13:00, с 17:00 до 18:00 и с 21:00 до 22:00.

Для устранения влияния локальных турбулентных потоков на точность получаемых данных были проведены предварительные тестовые замеры в разных точках сечения газохода на расстоянии 200 мм от выхода выхлопной трубы циклона. В результате этих замеров была выбрана точка, демонстрирующая наиболее стабильные значения концентрации, что позволяет избежать влияния локальных неоднородностей в газовом потоке. Вертикальное размещение точки отбора (на расстоянии 20 см от устья) выбрано для предотвращения влияния гравитационного оседания крупных частиц.

Подбор данного временного интервала обеспечивает учет суточного режима работы котельной, что позволяет анализировать воздействие временных факторов на уровень концентрации твердых частиц в выбросах. Замеры производились непрерывно в течение 10 минут, с последующим автоматическим усреднением показаний прибора. С целью минимизации ошибок, связанных с дрейфом нуля, перед каждым замером проводилась обязательная калибровка прибора.

Репрезентативность полученных данных обеспечивается калибровкой прибора, его актуальной поверкой, а также выполнением указаний инструкции завода-изготовителя, а также тем, что отбор проб осуществлялся экологическими работниками ОАО «РЖД», имеющими опыт производства подобных замеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты измерений массовой концентрации твердых частиц (ПМ) в выбросах котельной станции Биробиджан-1, полученные с помощью лазерного пылемера ЛПИ-05-Т в период с 10 по 18 октября 2024 года, представлены в табл. 2 и на рис 1.

Как видно из табл. 2 и рисунка 1, наблюдается отчетливая суточная периодичность концентрации ПМ. Пиковые значения концентрации регистрируются в утренние (06:00-07:00) и вечерние (17:00-18:00) часы, что коррелирует с пиковыми периодами потребления тепла. В ночное время (21:00-22:00) концентрация ПМ значительно снижается. Это объясняется суточным режимом ра-

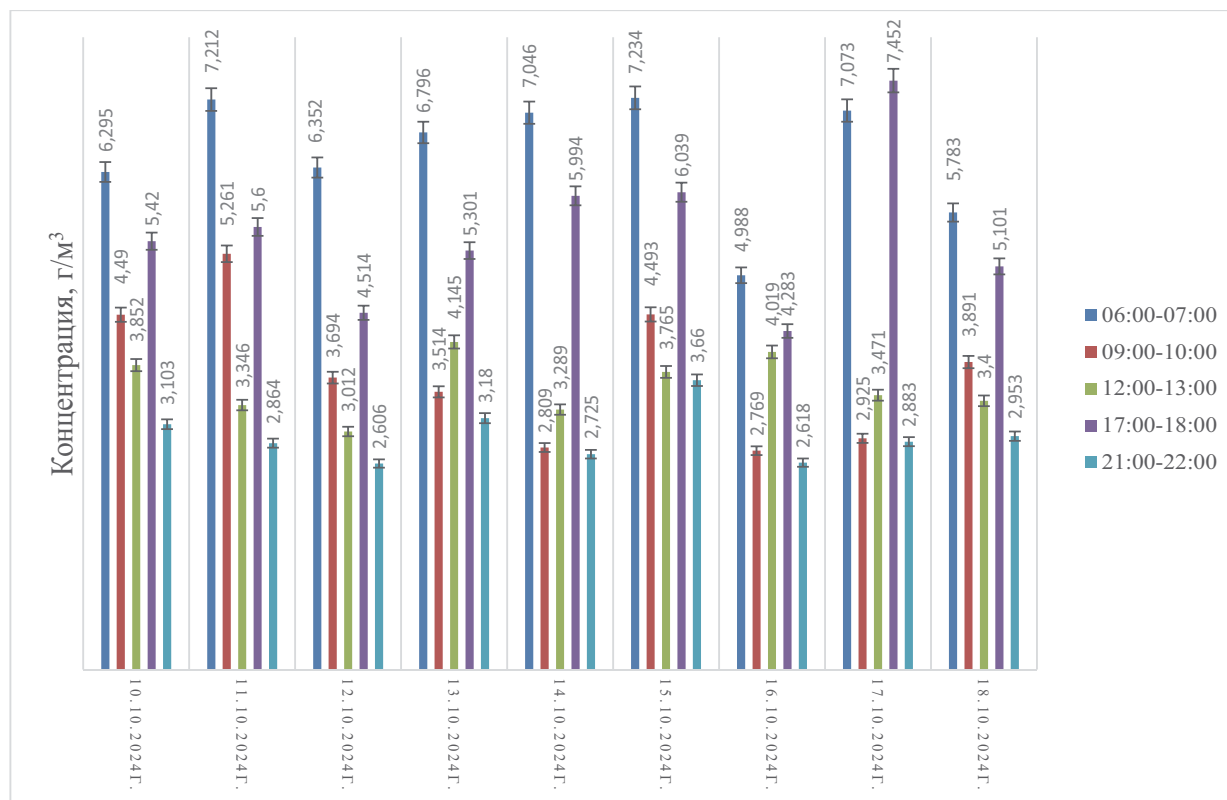


Рис. 1 – Результаты замеров твердых частиц на выходе выхлопной трубы

боты котельной, обусловленным потребностью в отоплении помещений станции в течение дня и снижением этой потребности в ночные часы, когда температура наружного воздуха снижается, а присутствие персонала в отапливаемых помещениях минимально. Снижение температуры в ночное время приводит к уменьшению теплопотерь, и следовательно, к уменьшению интенсивности работы котельной и снижению выбросов.

Авторами также было оценено влияние метеорологических условий [2] на выход твердых частиц из выхлопной трубы. Была обнаружена корреляция между скоростью ветра (F_f) и концентрацией твердых частиц. В дни с более высокой скоростью ветра (например, 12 октября) наблюдалась тенденция к снижению средней суточной концентрации твердых частиц. Это обусловлено более эффективным рассеиванием выбросов в атмосфере при повышенной скорости ветра. Напротив, в дни со слабым ветром или штилем (например, 10 октября) средняя суточная концентрация твердых частиц наблюдалась несколько выше.

Проведенные измерения показали наличие отчетливой суточной периодичности выбросов твердых частиц, с пиками в утренние и вечерние часы, что совпадает с периодами наибольшего потребления тепла. Полученные данные позволяют более точно определить периоды наибольшего воздействия котельной на окружающую среду и, соответственно, оптимизировать работу котельного и очистного оборудования.

Однако, необходимо отметить, что влияние метеорологических параметров на концентрацию твердых частиц является многофакторным и требует более детального исследования, включающего анализ направления ветра (DD), температуры воздуха (T), относительной влажности (U) и атмосферного давления (P). В данном исследовании влияние этих факторов может быть оценено лишь на качественном уровне. Для количественной оценки целесообразно использовать статистические методы, такие как корреляционный и регрессионный анализ, что позволит определить значимость каждого из факторов и построить прогнозную модель концентрации ПМ.

Полученные данные могут быть использованы для разработки мероприятий по снижению экологического воздействия котельной станции Биробиджан-1, в соответствии с требованиями природоохранного законодательства и целями национальных проектов по охране окружающей среды, а также для проектирования новых эффективных инерционных дымоочистных устройств. Так, авторами разработан новый запатентованный циклон-золоуловитель, обладающий повышенной степенью улавливания твердых частиц размерностью 30 мкм и более, подробно описанный в [3].

В работе [4] были проведены численные исследования эффективности очистки газового потока от частиц размерностью 1-10 мкм прямоугольным сепаратором, которые показали эффективность

Таблица 2 – Результаты замеров концентраций твердых частиц на выходе первой выхлопной трубы БМК ст. Биробиджан-1

Дата	Время замеров	Концентрация твердых частиц, г/м ³
10.10.2024г.	06:00-07:00	6,295±0,126
	09:00-10:00	4,490±0,090
	12:00-13:00	3,852±0,077
	17:00-18:00	5,420±0,108
	21:00-22:00	3,103±0,062
11.10.2024г.	06:00-07:00	7,212±0,144
	09:00-10:00	5,261±0,105
	12:00-13:00	3,346±0,067
	17:00-18:00	5,600±0,112
	21:00-22:00	2,864±0,057
12.10.2024г.	06:00-07:00	6,352±0,127
	09:00-10:00	3,694±0,074
	12:00-13:00	3,012±0,060
	17:00-18:00	4,514±0,090
	21:00-22:00	2,606±0,052
13.10.2024г.	06:00-07:00	6,796±0,136
	09:00-10:00	3,514±0,070
	12:00-13:00	4,145±0,083
	17:00-18:00	5,301±0,106
	21:00-22:00	3,180±0,064
14.10.2024г.	06:00-07:00	7,046±0,141
	09:00-10:00	2,809±0,056
	12:00-13:00	3,289±0,066
	17:00-18:00	5,994±0,120
	21:00-22:00	2,725±0,055
15.10.2024г.	06:00-07:00	7,234±0,145
	09:00-10:00	4,493±0,090
	12:00-13:00	3,765±0,075
	17:00-18:00	6,039±0,121
	21:00-22:00	3,660±0,073
16.10.2024г.	06:00-07:00	4,988±0,100
	09:00-10:00	2,769±0,055
	12:00-13:00	4,019±0,080
	17:00-18:00	4,283±0,086
	21:00-22:00	2,618±0,052
17.10.2024г.	06:00-07:00	7,073±0,141
	09:00-10:00	2,925±0,056
	12:00-13:00	3,471±0,070
	17:00-18:00	7,452±0,150
	21:00-22:00	2,883±0,058
18.10.2024г.	06:00-07:00	5,783±0,116
	09:00-10:00	3,891±0,078
	12:00-13:00	3,400±0,068
	17:00-18:00	5,101±0,102
	21:00-22:00	2,953±0,059

предложенного устройства. Прямоугольный сепаратор, установленный на выходе выхлопной трубы циклонного аппарата, позволит производить дополнительную очистку дымовых газов от частиц размерностью менее 10 мкм, что повысит общую степень улавливания частиц, выбрасываемых котельной установкой.

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ВЫБРОСОВ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Авторами на основе полученных данных предлагаются следующие мероприятия по снижению негативного воздействия котельной станции:

- Оптимизация режима работы котельной установки: Регулирование работы котла в соответствии с суточным графиком потребления тепла позволит снизить пиковые выбросы в утренние и вечерние часы. В данном аспекте заслуживает внимания разработка [5] по автоматизации контроля пламени и диспетчеризации горения котла, которая позволяет автоматически корректировать работу котельной установки по заданным режимным картам. Учитывая прогнозы погоды на предстоящий период работы котельной установки, возможно вносить корректировки в систему автоматизации режима ее работы, что приведет не только к повышению КПД котельного агрегата на 2-3%, но и также снизит пережог топлива при его эксплуатации, и как следствие будет снижен выброс твердых частиц. Для первичной настройки системы автоматизации контроля пламени и диспетчеризации горения котла, рекомендуется использовать программу для расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок малой производительности [6], которая предназначена для котлоагрегатов паропроизводительностью до 30 т/ч, работающих на жидком, твердом и газообразном топливе.

- Усовершенствование системы очистки дымовых газов: Установка или модернизация существующей системы очистки дымовых газов, например, использование авторской конструкции циклона [3] в сочетании с прямоугольным сепаратором [4], а также дальнейшая модернизация циклонного аппарата посредством изменения структуры потоков за счет закрученного потока, установки направляющих потока на внутренней поверхности циклона, установки фильтра тонкой очистки [7]. Для котельных средней и большой мощности рекомендуется замена одиночных золоуловителей на батарейные [8], это позволяет повысить эффективность очистки и снизить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Батарейные золоуловители обеспечивают более равномерное распределение газового потока и, как следствие, более полное осаждение золы и других твердых частиц. Но батарейные циклоны, в виду их значительных размеров, не представляется разместить в ограниченных производственных площадках, в таком случае рекомендуется замена одиночных золоуловителей на групповые. Помимо меньшего размера, они обладают повышенной степенью для очистки дымовых выбросов с низкой концентрацией твердых частиц, что характерно для современных котельных агрегатов в сочетании с экологичным топливом. Авторами разработана конструкция группового циклона для очистки газов [9], обладающей повышенной степенью улавливания твердых частиц, которая может быть использована не только в котельных теплоэнергетической отрасли, но также в нефтехимической, нефтеперерабатывающей и металлургической промышленности.

- Использование более экологически чистого топлива: Анализ возможности перехода на более экологически чистое топливо, в том числе на жидкое и газовое топливо, пеллеты и пр., снижающее объем твердых частиц в выбросах. При переходе на альтернативные источники топлива, в том числе более экологичные, встает вопрос экономической целесообразности использования данного топлива. В работе [10] проведено исследование эффективности использования пеллет и сортированного угля в автоматизированных котельных, согласно которому действующие котельные, работающие на буром угле, целесообразно переводить на пеллеты. Учитывая, что подавляющее большинство котельных, предприятий железнодорожного транспорта, располагаются в непосредственной близости от железных дорог и грузовых станций, доставка транзитным грузом пеллет не должна повлечь серьезных затрат, в связи с чем альтернативе жидкому топливу, на которое сейчас переводятся многие угольные котельные ОАО «РЖД», авторами рекомендуется переход действующих автоматизированных котельных, в том числе блочно-модульных, на пеллеты.

- Постоянный мониторинг выбросов: Внедрение системы непрерывного мониторинга выбросов твердых частиц с автоматической регистрацией данных и оповещением о превышениях нормативов, для принятия своевременных мер по ремонту и обслуживанию котельного и очистного оборудования. Перспективной разработкой в данном направлении является устройство для мониторинга загрязнения наружной воздушной среды твердыми частицами [11]. Устройство содержит циклонный пылеуловитель, корпус с установленным в нем центробежным (радиальным) вентилятором и шаговым двигателем, кассету с установленной в ней CMOS-матрицы и источниками когерентного излучения с линзами, кассету с аналитическим фильтром, на котором закреплены тензодатчик для измерения массы твердых частиц и датчик засоренности аналитического фильтра, заборник наружного воздуха, в котором размещены датчики: давления атмосферного воздуха, влажности наружного воздуха, температуры наружного воздуха и воздуха в циклоне, массового расхода прокачиваемого воздуха, осушитель воздуха, кроме этого, устройство оснащено скатными пластинами для сброса твердых частиц со стенок циклонного пылеуловителя, при этом устройство для мониторинга

загрязнения наружной воздушной среды твердыми частицами может функционировать как в дискретном, так и в непрерывном режимах, при этом контролирующие датчики установлены с возможностью передачи сигналов в одноплатный компьютер по защищенному каналу связи, помимо этого, устройство оснащено независимым источником электропитания для автономной работы. Устройство может быть использовано для качественной и количественной оценки загрязненности наружной воздушной среды твердыми частицами, выбрасываемых котельными, работающими на твердом топливе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты измерений показали отчетливую суточную динамику концентрации твердых частиц, с пиковыми значениями в утренние и вечерние часы, что напрямую связано с режимом работы котельной и, соответственно, с потребностью в отоплении. Более низкие концентрации твердых частиц наблюдались в ночные часы, что объясняется снижением теплопотерь в помещениях и уменьшением интенсивности работы котельной.

Необходимо отметить ограниченность данного исследования, обусловленную недостаточным периодом наблюдения (9 дней) и отсутствием учета параметров работы котла (расход топлива, температура воды и т.д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Секачев, А. В. Загрязнение атмосферного воздуха твердотопливной котельной на территории Кемеровской области – Кузбасса / А.В. Секачев, М.С. Ракина // Актуальные научно-технические средства и сельскохозяйственные проблемы: Материалы XII национальной научно-практической конференции с международным участием, Кузбасский ГАУ, 20 июня 2024 года. – Кемерово: Кузбасский ГАУ, 2024. – С. 378-383.
2. Архив погоды в Биробиджане. [Электронный ресурс]. URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Биробиджане (дата обращения: 17.03.2025).
3. Пат. № 225503 Российская Федерация, МКИ В04С 5/12. Фильтр-циклон для очистки газов / Журавлев А. А., Катин В. Д. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» ; № 2023124204 ; заявл. 19.09.2023 ; опубл. 23.04.2024. Бюл. № 12.
4. Дмитриев, А.В. Очистка газовых выбросов котельных установок от твердых частиц / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, В. Л. Нгуен // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 3-9. – DOI 10.30724/1998-9903-2020-22-1-3-9.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023667254 Российская Федерация. Система автоматизации контроля пламени и диспетчеризации горения котла : № 2023663625 : заявл. 27.06.2023 : опубл. 14.08.2023 / Ю. Н. Некрасов, А. И. Шамраева, Д. П. Морозюк, В. И. Алейник.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024613014 Российская Федерация. Программа расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок малой производительности : № 2024611380 : заявл. 26.01.2024 : опубл. 07.02.2024 / А. Г. Гудков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет».
7. Яковлева, Е.Е. Анализ возможности использования длинноконического циклона типа СК-ЦН-34 для очистки выбросов котельных / Е.Е. Яковлева, Е.Ю. Шарай // Будущее машиностроения России : Сборник докладов Четырнадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. В 2-х томах, Москва, 21–24 сентября 2021 года. Том 2. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2022. – С. 92-99.
8. Сагитов, С.Р. Повышение эффективности электрофильтров и золоуловителей / С. Р. Сагитов // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 98-10. – С. 215-217. – DOI 10.18411/trnio-06-2023-591.
9. Патент на полезную модель № 220182 U1 Российская Федерация, МПК В04С 5/26. Групповой циклон для очистки газов : № 2023110430 : заявл. 21.04.2023 : опубл. 30.08.2023 / В. Д. Катин, А. А. Журавлев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения». – EDN VAUJSO.
10. Иванова, И.Ю. Сравнительная эффективность использования пеллет и сортированного угля в автоматизированных котельных (на примере центральной экологической зоны Байкальской природной территории) / И.Ю. Иванова, Е.В. Губий, Е.П. Майсюк // Глобальные вызовы и национальные экологические интересы: экономические и социальные аспекты : Сборник материалов XVII международной научно-практической конференции Российского общества экологической экономики, Новосибирск, 03–08 июля 2023 года [под редакцией Т.О. Тагаевой, Л.К. Казанцевой]. – Новосибирск: Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, 2023. – С. 244-251.
11. Патент на полезную модель № 210148 U1 Российская Федерация, МПК G01N 1/22, G01N 5/00, G01N 21/94. Устройство для мониторинга загрязнения наружной воздушной среды твердыми частицами : № 2021137212 : заявл. 15.12.2021 : опубл. 30.03.2022 / К. С. Голохваст, А. М. Артеменко, И. А. Вахнюк [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий российской академии наук.

ANALYSIS OF PARTICULATE EMISSIONS FROM THE BLOCK-MODULAR BOILER HOUSE BIROBIDZHAN-1 AND DEVELOPMENT OF MEASURES TO REDUCE THEM

© 2025 A.A. Zhuravlev¹, V.D. Katin^{1,2}

¹ Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

² Pacific National University, Khabarovsk, Russia

This article presents the results of a study of solid particle emissions from the block-modular boiler house of the Birobidzhan-1 JSC Russian Railways station, which operates on solid fuel (coal). A laser dust meter LPI-05-T was used to determine the mass concentration of solid particles in the exhaust gases of the cyclone apparatus CN-15. The analysis of the obtained data was carried out taking into account meteorological conditions and the operating mode of the boiler house. Measures and technical solutions for reducing the negative impact of the boiler house are proposed.

Keywords: block-modular boiler house, solid fuel, coal fuel, emissions, solid particles, ash and soot, CN-15, environmental monitoring.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-2-180-186

EDN: IRVZWC

REFERENCES

1. *Sekachev, A.V., & Rakina, M.S. (2024).* Air pollution from a solid fuel boiler plant in the Kemerovo region – Kuzbass. Proceedings of the XII National Scientific and Practical Conference with International Participation, Kuzbass SAU, June 20, 2024, Kemerovo: Kuzbass SAU, 378-383.
2. Weather archive in Birobidzhan. (n.d.). Retrieved March 17, 2025, from https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Биробиджане (Note: Direct URL inclusion is often discouraged in formal bibliographies; consider replacing with a database identifier if available.)
3. *Zhuravlev, A.A., & Katin, V.D. (2024).* Filter-cyclone for gas purification. Russian Federation Patent No. 225503, IPC B04C 5/12. Application No. 2023124204, filed September 19, 2023, published April 23, 2024, Bulletin No. 12.
4. *Dmitriev, A. V., Zinurov, V. E., Dmitrieva, O. S., & Nguyen, V. L. (2020).* Cleaning of gaseous emissions from boiler plants from solid particles. Proceedings of Higher Educational Institutions. Problems of Power Engineering, 22(1), 3-9. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-3-9.
5. *Nekrasov, Y. N., Shamraeva, A. I., Morozuk, D. P., & Aleynik, V. I. (2023).* System for automating flame control and dispatching of boiler combustion. Russian Federation Computer Program Registration Certificate No. 2023667254. Application No. 2023663625, filed June 27, 2023, published August 14, 2023.
6. *Gudkov, A.G. (2024).* Program for calculating emissions of pollutants into the atmosphere from low-capacity boiler plants. Russian Federation Computer Program Registration Certificate No. 2024613014. Application No. 2024611380, filed January 26, 2024, published February 7, 2024.
7. *Yakovleva, E.E., & Sharay, E.Yu. (2022).* Analysis of the possibility of using a long-conical cyclone of the SK-CN-34 type for cleaning boiler emissions. Proceedings of the Fourteenth All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists: The Future of Mechanical Engineering in Russia, Vol. 2, Moscow: Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 92-99.
8. *Sagitov, S.R. (2023).* Increasing the efficiency of electrostatic precipitators and dust collectors. Trends in the Development of Science and Education, 98-10, 215-217. DOI: 10.18411/trnio-06-2023-591.
9. *Katin, V. D., & Zhuravlev, A. A. (2023).* Group cyclone for gas purification. Russian Federation Utility Model Patent No. 220182 U1, IPC B04C 5/26. Application No. 2023110430, filed April 21, 2023, published August 30, 2023.
10. *Ivanova, I.Yu., Gubiy, E.V., & Maisuk, E. P. (2023).* Comparative effectiveness of using pellets and sorted coal in automated boiler houses (using the example of the central ecological zone of the Baikal natural territory). Global Challenges and National Environmental Interests: Economic and Social Aspects, Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference of the Russian Society of Ecological Economics, Novosibirsk, July 3-8, 2023, Novosibirsk: Institute of Economics and Industrial Production Organization, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 244-251.
11. *Golohvast, K.S., Artemenko, A.M., Vakhnuk, I.A., et al. (2022).* Device for monitoring air pollution with particulate matter. Russian Federation Utility Model Patent No. 210148 U1, IPC G01N 1/22, G01N 5/00, G01N 21/94. Application No. 2021137212, filed December 15, 2021, published March 30, 2022.