

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-376-390

EDN: DURDLT

УДК 697.946

Научная статья / Research article

Вклад источников индивидуального теплоснабжения в загрязнение воздуха городов Сибири и его снижение бытовыми электрофильтрами

С.В. Калашников^{id}✉, А.В. Номоев^{id}, Т.А. Чимытов^{id}, И.А. Южаков^{id},
М. Самбуу^{id}, С.-Э. Цырен-Очир^{id}

Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация
✉betch_kail@mail.ru

Аннотация. Цель исследования — обоснование целесообразности применения бытовых электрофильтров для снижения выбросов твердых частиц от индивидуальных источников теплоснабжения (ИИТ) в городах Сибири на примере Улан-Удэ. Объект исследования — выбросы твердых загрязняющих веществ от частных котельных и печей, работающих на угле и дровах. Методология включает натурные измерения запыленности дымовых газов (аспирационный метод, термоанемометрия), расчет по формуле Дейча, лабораторное моделирование электрофильтра с золовым уносом и анализ гранулометрического состава. Средняя запыленность дыма ИИТ составляет $1,0 \pm 0,2$ г/м³ при расходе 260 ± 70 м³/ч; оснащение 50 % угольных котельных электрофильтрами с эффективностью 99 % позволит снизить выбросы твердых частиц на 3000–4000 т/год. Разработанный двухзонный электрофильтр с потребляемой мощностью ~315 Вт и габаритами 1,4×0,45×0,7 м может быть интегрирован в дымоход частного дома взамен стандартной секции.

Ключевые слова: выбросы в атмосферу, золовый унос, загрязнение атмосферы, электрофильтр, формула Дейча, коронный разряд, Улан-Удэ

Вклад авторов. Калашников С.В. — концептуализация. Номоев А.В. — ресурсы, получение финансирования. Чимытов Т.А. — создание черновика рукописи. Южаков И.А. — проведение исследования. Самбуу М. — проведение исследования, верификация данных. Цырен-Очир С.-Э. — формальный анализ. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, научная тема FWSF-2024-0013.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Калашников С.В., Номоев А.В., Чимытов Т.А., Южаков И.А., Самбуу М., Цырен-Очир С.-Э., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

История статьи: поступила в редакцию 08.12.2025; доработана после рецензирования 21.01.2026; принята к публикации 15.02.2026.

Для цитирования: Калашиников С.В., Номоев А.В., Чимытов Т.А., Южаков И.А., Самбуу М., Цырен-Очир С.-Э. Вклад источников индивидуального теплоснабжения в загрязнение воздуха городов Сибири и его снижение бытовыми электрофильтрами // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 376–390. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-376-390>
EDN: DURDLT

The contribution of individual heat sources to air pollution in Siberian cities and its reduction by household electrostatic precipitators

Sergey V. Kalashnikov^{ID}✉, Andrey V. Nomoev^{ID}, Timur A. Chimytov^{ID}, Ilya A. Yuzhakov^{ID}, Munkhtsetseg Sambuu^{ID}, Soyol-Erdene Tseren-Ochir^{ID}

Institute of Physical Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation

✉betch_kail@mail.ru

Abstract. The aim of the study is to justify the feasibility of using household electrostatic precipitators (ESPs) to reduce particulate emissions from individual heat sources (IHS) in Siberian cities, using Ulan-Ude as a case study. The object of the study is particulate emissions from private coal- and wood-fired boilers and furnaces. Methodology includes field measurements of flue gas dust content (aspiration method, thermoanemometry), Deutsch formula calculations, laboratory ESP modelling with fly ash, and particle size distribution analysis. Average IHS flue gas dust concentration is $1.0 \pm 0.2 \text{ g/m}^3$ at a flow rate of $260 \pm 70 \text{ m}^3/\text{h}$; equipping 50% of coal-fired boilers with ESPs (99% efficiency) would reduce particulate emissions by 3000–4000 t/year. The developed two-zone ESP with power consumption of ~315 W and dimensions of $1.4 \times 0.45 \times 0.7 \text{ m}$ can be integrated into the chimney of a private house instead of a standard section.

Keywords: atmospheric emissions, fly ash, atmospheric pollution, electrostatic precipitator, Deutsch formula, corona discharge, Ulan-Ude

Authors' contribution. S.V. Kalashnikov — conceptualization. A.V. Nomoev — resources, obtaining financing. T.A. Chimytov — writing — review and editing. I.A. Yuzhakov — investigation. M. Sambuu — investigation, validation. S.-E. Tsyren-Ochir — formal analysis. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Funding. The work was carried out with the financial support of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, scientific topic FWSF-2024-0013.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. All data obtained during this study are included in the published article.

Article history: received 08.12.2025; revised 21.01.2026; accepted 15.02.2026.

For citation: Kalashnikov SV, Nomoev AV, Chimytov TA, Yuzhakov IA, Sambuu M, Tseren-Ochir S-E. The contribution of individual heat sources to air pollution in Siberian cities and its reduction by household electrostatic precipitators. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):376–390. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-376-390> EDN: DURDLT

Введение

Вряд ли стоит отдельного упоминания то, что потребность человека в чистом воздухе для дыхания является первоочередной. В Сибирском (СФО) и Дальневосточном федеральном округе (ДФО) насчитывается 39 городов с превышением комплексного индекса загрязнения атмосферного воздуха более чем в 7 раз по данным Росгидромета за 2024 г.¹ [1]. В промышленных городах источниками загрязнения атмосферы, как правило, являются крупные промышленные предприятия. Во многих городах, не имеющих подключения к магистральному газу, превышение допустимых концентраций загрязняющих веществ обусловлено значительным вкладом индивидуальных источников теплоснабжения (в дальнейшем — ИИТ), работающих на угле или дровах. 12 регионов Сибири и Дальнего востока не имеют магистрального газа вообще, в трех регионах к газу подключены менее 20 % населения, а в семи субъектах — менее 10 % [2]. Самый высокий уровень газификации в указанных округах — 27,1 % у Тюменской области.

При этом доля введенного в строй индивидуального жилищного строительства (ИЖС) от общего ввода жилья для Сибирского федерального округа в 2023 г. составляет в среднем 61,3 % [3], для Дальневосточного федерального округа — 56 %. Причем за последние годы прослеживается тенденция к увеличению доли ИЖС, большая часть которого вводится в городах и их агломерациях, увеличивая количество выбросов в атмосферу.

Существенное превышение норм загрязнения воздуха отмечается во многих городах Сибири и Дальнего востока: Братск, Красноярск, Новокузнецк, Норильск, Омск, Иркутск, Чита, Гусиноозёрск, Селенгинск, Улан-Удэ, Кызыл, Абакан, Черногорск, Барнаул и др., характерно и для городов других стран, например Улан-Батора.

¹ Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2024 год. Москва: Росгидромет, 2025. URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/iblock/88f/%D0%9E%D0%B1%D0%B7%D0%BE%D1%80%20%D0%B7%D0%B0%202024%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4_300625.pdf?ysclid=mrachsi2wd806640418 (дата обращения: 05.11.2025).

Рассмотрим проблематику на примере Улан-Удэ — города, который имеет один из самых высоких в ДВФО уровней загрязнения воздуха и при этом характеризуется широким набором причин, приводящих к такой ситуации. В Улан-Удэ насчитывается, по разным данным, от 37 [4] до более 45 (в агломерации — 67) тысяч ИЖС, которые отапливаются большей частью дровами и углем, так как Республика Бурятия не имеет магистральной газификации. При этом ожидается, что число домовладений будет в ближайшее время только расти. Также, помимо промышленных объектов, в городе имеется 144 муниципальных и ведомственных котельных и порядка 2900 малых угольных котлов на складских, производственных, торговых объектах [5]. Это приводит к общеизвестным проблемам с загрязнением воздуха в зимний период и ухудшению здоровья жителей.

В 2024 г. в Улан-Удэ отмечалось превышение ПДК бенз(а)пирена до 38,8 раза, формальдегида в 3,7 раза, взвешенных веществ в 2,4 раза, мелкодисперсных взвешенных частиц размером до 10 мкм и до 2,5 мкм в 1,4 раза (каждый), фенола в 1,3 раза, озона в 1,2 раза² [6]. Улан-Удэ входит в десятку городов России с самым высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха.

В достаточно большой степени неблагоприятное состояние атмосферного воздуха в городе обусловлено наличием большого количества частных домовладений с отоплением углем и дровами, дым от которых не уходит высоко в атмосферу, а в результате температурной инверсии стелется над землей. Являясь децентрализованными источниками, данная категория наиболее трудная с точки зрения ее экологического реформирования. Любые мероприятия в этом направлении являются очень дорогостоящими или для бюджета города (организация централизованного теплоснабжения, модернизация электросетей), или для самих частных домовладений (переход на электроотопление, сжиженный газ, топливные брикеты и пр.).

В целом высокая загазованность воздуха из-за разросшегося ИЖС не уникальна для Улан-Удэ и вызвана в первую очередь отсутствием газовой инфраструктуры, поэтому исследование не ограничивается выбранным городом, хотя и разработано на его примере [7].

Предполагается, что разработка, создание и применение в частных котельных специализированных электрофильтров приведет к значительному снижению загрязняющих выбросов в некоторых городах Сибири.

Цель исследования — анализ режимов работы ИИТ, эскизная разработка модели электрофильтра для них, анализ технико-экономической целесообразности их применения.

² Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Республики Бурятия в 2023 году» / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Бурятия. Улан-Удэ, 2024. URL: <https://egov-buryatia.ru/mpr/files/%D0%93%D0%94%202023.pdf> (дата обращения: 24.01.2025).

Исследование общего вклада ИИТ в загрязнение воздуха

По данным ООО «Институт проектирования, экологии и гигиены», который по заказу Министерства природы Республики Бурятия проводил экологическое исследование загрязнения воздуха в г. Улан-Удэ, преобладающими источниками загрязняющих выбросов являются промышленные объекты (около 40 %), индивидуальные источники теплоснабжения (около 55 %) и транспорт (не более 5 %) [8]. К аналогичным данным пришли и исследователи БИП СО РАН [4; 9]. В других городах с высокой долей ИЖС и отсутствием магистрального газа соотношение источников выбросов будет, конечно же, другим, но доля ИИТ в нем будет в любом случае существенна. Разрастающийся частный сектор — жилые кварталы, состоящие из домов с автономными угольными небольшими котельными и дровяными печами — основной источник загрязнения атмосферного воздуха в нескольких десятках городов Сибири и Дальнего Востока.

Среди основных веществ, загрязняющих воздух в Улан-Удэ, лидируют твердые вещества, диоксид серы, оксид углерода, которые в суммарном объеме выбросов составляют 86–88 % [5; 7]. Можно сделать предположение о том, что ИИТ, работающие на угле, выбрасывают в воздух твердых частиц не меньше в удельном исчислении, что и муниципальные котельные, но в большем абсолютном значении. Для оценки запыленности дымовых газов частных котельных авторами работы произведено ее измерение на десяти ИИТ, оснащенных твердотопливными котлами ZOTA «Cuba» (25 кВт, на угле), КО 40ГК (20 кВт, на угле), «Сибирь-GEFEST» КВО 15 ТЭ (15 кВт, на угле), Wirt Smart+ (15 и 25 кВт, на угле), Pixel (8 кВт, на дровах) и с двумя, изготовленными частными предприятиями (с мощностью около 20 кВт, на угле и на дровах).

Измерения производились аспирационным методом. Из выпускной трубы котла аспиратором отбирался дым в течение $t = 5$ мин, по разности масс фильтра до и после отбора определялась масса твердых частиц уноса. Расход дыма котлов вычислялся путем измерения диаметра d его отводной трубы и скорости потока термоанемометром. С использованием полученных данных рассчитывалась запыленность дыма.

По результатам измерений и расчетов для декабря 2024 г со средней температурой наружного воздуха $-18,7$ °С, средняя запыленность дыма от ИИТ составила $1 \pm 0,2$ г/м³, а средний расход дыма — 260 ± 70 м³/ч. По данным [3], в г. Улан-Удэ доля домов с ИИТ в виде печей 77,7 и 22,3 % — в виде котлов. Исходя из общего числа домов, равного 45 тыс., выходит, что котлами оборудовано около 10 тыс. их них. Продолжительность отопительного сезона составляет 7,8 мес., и если предположить, что хотя бы 4 мес. (2880 ч) из них котлы работают в режиме, близком к определенному в декабре, и что они среднем близки к нашей выборке по производительности, то за год в воздух выбрасывается $10\,000 \times 2880 \text{ ч} \times 260 \text{ м}^3/\text{ч} \approx 7,5$ млрд м³ дыма, содержащего

7,5 млрд $\text{м}^3 \times 1 \text{ г/м}^3 \approx 7500 \text{ т}$ твердых частиц сажи с канцерогенными веществами. Расчет может быть завышен, однако в любом случае речь идет о тысячах тонн золы только от ИИТ, оснащенных твердотопливными котлами, выбрасываемой и осаждающейся в городе и пригороде. К тому же, по данным авторов [4], всего выбрасывается частным сектором порядка 48,6 тыс. т (это включая газообразные вещества) загрязняющих веществ в год, так что наша оценка выглядит вполне реалистично.

Анализ методов снижения выбросов ИИТ

Решить проблему загрязнения воздуха ИИТ возможно при использовании бездымного топлива, переводе на электро- или газовое отопление, при переводе нагрузок с малых котельных на ТЭЦ. Указанные мероприятия являются дорогостоящими проектами с большими сроками реализации. Для снижения выбросов больших котельных на данный момент по федеральной программе «Чистый воздух» в рамках национального проекта «Экологическое благополучие» в ряде городов проводятся мероприятия, включающие увеличение доли электротранспорта, закрытие или оснащение муниципальных котельных электрофильтрами и пр. Однако существенная доля выбросов, как показано выше, производится ИЖС, и для снижения этой доли предлагается чаще всего перевод на электрическое отопление, что требует больших капиталовложений. При этом ввиду высокой стоимости электроэнергии во многих регионах полный перевод отопления ИЖС на электричество выглядит довольно оптимистическим прогнозом — наверняка многие домовладения продолжают пользоваться твердым топливом.

Альтернативой может являться оснащение ИИТ доступными устройствами очищения дыма. Загрязненный газ может быть очищен различными способами: механическим, в силовых полях, сухим и мокрым способом и т.п. Механическая очистка (фильтрация) создает высокое сопротивление потоку и большие расходы на сменные элементы. Из наиболее распространенных способов очистки в силовых полях можно отметить циклоны, использующие инерционную силу для выведения частиц из потока, а также электрофильтры, воздействующие на предварительно заряженные частицы загрязнителя электрическим полем. Циклоны имеют высокое сопротивление, требуют большой скорости потока и могут работать только вместе с дымососами, которых чаще всего в небольших котельных нет. Электрофильтр таких недостатков лишен, однако вместе с тем и более сложен, дорог, требует источника электропитания.

Указанные способы удаляют только твердые частицы из дыма, однако они в большей степени и создают эффект смога над городом, более того, эти частицы адсорбируют многие опасные канцерогенные вещества, такие как, например, бензпирен. Поэтому очистка дыма от сажевых частиц очень актуальна, тем более она реализуема технически проще, чем очистка дыма от вредных газов.

Таким образом, наиболее отработанной и применимой для бытовых условий, не требующей крупных изменений в частных котельных является система очистки с использованием небольшого электрофилтра. Количество выбрасываемого дыма частной котельной невелико, стоит ожидать, что бытовой электрофилтр должен иметь низкие габариты, низкую потребляемую мощность и стоимость.

Производителями представлены электрофилтры или для применения в условиях кухонных помещений общепита, или для промышленных предприятий (табл.). Первые имеют низкую производительность (до 4000 м³/ч) [9], предназначены для монтажа в помещениях и совмещены с другими видами филтров. Такие агрегаты не имеют систем автоматической очистки и складирования уловленной пыли, поэтому требуют периодической промывки. Промышленные электрофилтры характеризуются высокой пропускной способностью (70–430 тыс. м³/ч), очень большими размерами, стоимостью, энергопотреблением и массой — этот класс агрегатов выходит за рамки рассматриваемой темы.

Российские и некоторые зарубежные производители электрофилтров, их производительность и назначение

Фирма-производитель	Производительность, м ³ /ч	Температура газа, °С	Назначение
ООО «НПП «Ятаган»	1000–4000	10–200	Для промышленного или бытового приготовления пищи на кухне
ООО «Завод Экострада»	3000	н.д.	
ООО «Провелдинг»	1000–4000	н.д.	
ООО «Финго-комплекс»	50000–2 000 000	10–425	Обеспыливание газов в энергетике, металлургии, горнодобывающей, химической и других отраслях промышленности
ХК «Кондор Эко»	14000–300 000	до 330	
BotonAir (Китай)	до 30 000	н.д.	Для промышленного приготовления пищи на кухне, некоторые виды промышленного производства
D rr Systems (Германия)	до 1 000 000	н.д.	Обеспыливание газов в различных отраслях промышленности
F.L. Smidth Airtech (Дания)	50 000–2 000 000	н.д.	

Источник: составлено С.В. Калашниковым, А.В. Номоевым.

Однако активные исследования последних лет подтверждают техническую возможность и эффективность создания микроэлектрофилтров именно для малых котельных. В частности, в [10] представлены результаты полевых испытаний компактных электрофилтров в реальных жилых домах: при стабильной работе котла степень очистки достигает 90 %, а при длительной эксплуатации пользователями — 70–82 %, что позволяет значительно снизить концентрацию PM_{2.5} и PM₁₀.

На рынке слабо представлены электрофилтры в качестве готовых технических решений для ИИТ. Учитывая потребность в очистке дымовых газов, имеет смысл оценить как эффективность, так и экономическую обоснованность массового применения электрофилтров целевого для ИИТ типоразмера.

Расчет и экспериментальная проверка электрофильтра

Очистка газов от взвешенных в них твердых или жидких частиц в электрофильтрах происходит под действием электрических сил, для чего частицам сообщается электрический заряд. Заряженные частицы в результате воздействия электрического поля выводятся из очищаемого газового потока и осаждаются на собирающих электродах.

В большинстве применений эти этапы могут выполняться в одной рабочей камере [11]. В однозонных электрофильтрах ряд разрядных проволок (коронирующих электродов) расположен между параллельными собирающими (осадительными) электродами-пластинами, образующими газопоток. Электроды подключены к источнику высокого напряжения. У тонкого электрода возникает коронный разряд, электроны движутся к положительно заряженным осадительным электродам, по пути оседая на частицах пыли и заряжая их. В итоге пыль электрическим полем выводится из потока и оседает на пластинах, которые очищаются механическим воздействием, в результате чего комки осажденной пыли падают в бункеры, расположенные в нижней части фильтра.

Степень очистки газов электрофильтром вычисляется по формуле Дейча [11; 12]

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\omega L}{dv}\right), \quad (1)$$

где L — длина осадительной части электрофильтра, м; v — скорость потока дымовых газов, м/с; ω — средняя скорость частиц поперек электрофильтра, м/с; d — расстояние между коронирующим и осадительным электродом, м. Задав η , d , v и ω , можно рассчитать длину фильтра.

Степень очистки для промышленных электрофильтров составляет 98–99 % [13], то есть довольно высока. Целесообразно задать для фильтра ИИТ значение $\eta = 0,99$.

Чем меньше расстояние между коронирующим и осадительным электродом d , тем выше при прочих равных степень улавливания электрофильтра, однако она ограничивается электрической прочностью разрядного промежутка и при обычном напряжении питания, равном 50 кВ, не может быть менее 100 мм [11; 13].

Скорость движения газа в электрофильтрах не превышает 1–1,5 м/с. С увеличением скорости уменьшается поперечный габарит фильтра, но увеличивается его длина, что для наших целей совершенно нежелательно, поэтому ограничимся низкой скоростью, равной 0,3 м/с. Площадь поперечного сечения активной части фильтра $S = Q/v$, откуда следует, что площадь сечения активной части электрофильтра для производительности 300 м³/ч (удовлетворяющей большинству ИИТ) должна составлять $S = 0,28$ м².

По соображениям удобного монтажа на котельных или печах, а также ради уменьшения количества электродов, изоляторов и элементов системы очистки выгоднее делать электрофильтры высокими, но с ограниченной

шириной. Поэтому лучше выбирать ширину активной части, равную 0,42 м, и соответственно площади сечения высоту, равную 0,67 м.

Зная среднюю скорость дрейфа частиц поперек электрофильтра ω , можно задать и длину осадительной части фильтра L , однако расчет ω основан на эмпирически выведенных закономерностях, которые дают большую погрешность, поэтому было решено определить скорость на натурной модели электрофильтра.

Лабораторный электрофильтр включает в себя один газовый проход. Конструкция фильтра модульная, длина активной части каждого модуля равна 0,96 м, высота — 0,76 м (рис. 1). Измерения производились с использованием одного модуля при расстоянии между осадительными электродами и кончиками игл коронирующих электродов, равном 100 мм. Агрегат оснащен диффузором с газораспределительным устройством и конфузором, на выходе которого установлен тангенциальный вентилятор.



Рис. 1. Лабораторный электрофильтр со снятым осадительным электродом

Источник: фото С.В. Калашникова.

Через фильтр прокачивался воздух комнатной температуры с расходом 150–200 м³/ч, в который инжектировался золовый унос, взятый как с циклонных очистителей муниципальных котельных (работающих на типичном для региона сорте угля со сжиганием его на колосниках, т.е. так же, как и в котлах ИИТ). Анализ гранулометрического состава золового уноса, взятого из этих источников, показал его общую тождественность, т.е. можно сделать вывод, что в среднем зола по размеру частиц, образующихся в различных котлах, практически одинакова (рис. 2). Содержание пыли в воздухе поддерживалось в диапазоне 1–5 г/м³. Входная и выходная запыленность воздуха измерялась

оптическими датчиками, отбор газа для которых производился трубками Пито. Датчики позволяют определить массовое содержание частиц двух диапазонов размеров — 0,3–2,5 и 2,5–10 мкм.

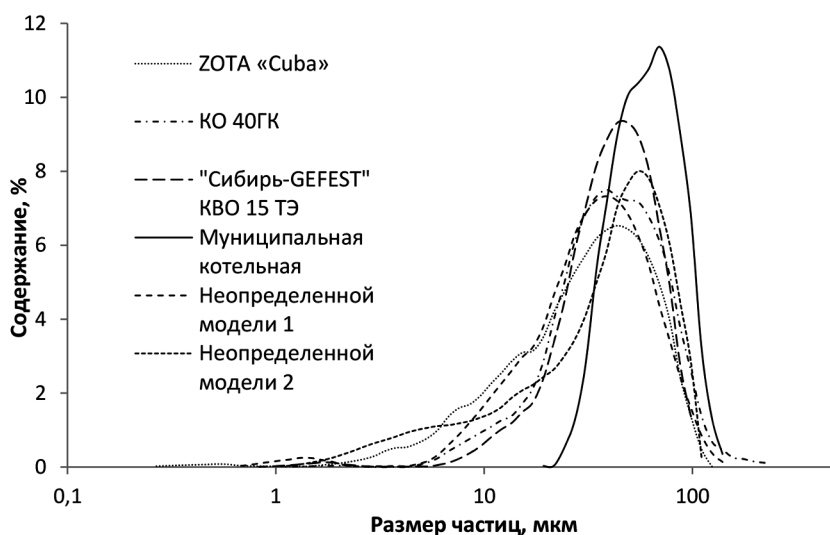


Рис. 2. Гранулометрический состав золы от различных источников выбросов

Источник: составлено С.В. Калашниковым.

Для вычисления поперечной скорости частиц на макете фильтра производилось измерение степени улавливания пыли в зависимости от расстояния, на котором отбирался газ. Полученные кривые входной ($\zeta_{\text{вх.}}$) и выходной ($\zeta_{\text{вых.}}$) запыленности газа от времени эксперимента использованы для вычисления степени улавливания электрофильтром по формуле $\eta = 1 - \zeta_{\text{вых.}} / \zeta_{\text{вх.}}$. На длине осаждения 0,2 м было получено значение степени улавливания пыли около 75 %, на длине 0,9 м — 99 % (рис. 3).

Исходя из известной длины макета электрофильтра и степени осаждения пыли, по формуле (1) была вычислена средняя скорость дрейфа частиц:

$$\omega = -\frac{dv \ln(1-\eta)}{L} = 0,16 \text{ м/с.} \quad (2)$$

Скорость дрейфа частиц, однако, зависит от расстояния между электродами и напряжения на них, а также от размера частиц, так как приобретаемый ими заряд пропорционален их радиусу. Однако для практического расчета при постоянном гранулометрическом составе золы представленный метод определения ω вполне достаточен и может быть применен для расчета длины фильтра при других изначально заданных параметрах.

Таким образом, для очистки 300 м³/ч дыма от твердых частиц необходим электрофильтр с поперечными размерами около 0,45×0,7 м, длиной активной части около 0,9 м (вместе с диффузором и конфузором около 1,3–1,4 м). При рекомендуемом расстоянии между соседними коронирующими электродами

0,1 м [14] их потребуется 9 шт. На ширину активной части такого фильтра необходимо два газовых прохода с межэлектродными расстояниями 100 мм, таким образом, общее число коронирующих электродов равно 18 при длине каждого около 0,7 м, то есть общая их длина составит 12,6 м.

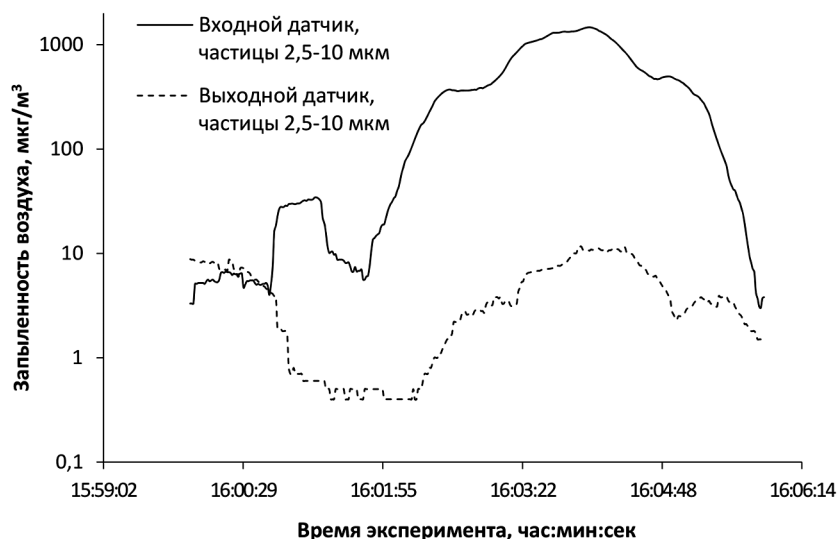


Рис. 3. Данные о запыленности на входе в фильтр и на расстоянии 0,9 м от него. Отношение мгновенной выходной и входной запыленностей дает значение степени улавливания, равное 99 %

Источник: составлено С.В. Калашниковым.

Линейная плотность тока при экспериментальном осаждении составляла 0,5 мА/м. Таким образом, потребляемый ток разрабатываемого электрофильтра будет около $12,6 \text{ м} \times 0,5 \text{ мА/м} = 6,3 \text{ мА}$. Это дает потребляемую мощность фильтром $P = 315 \text{ Вт}$, то есть достаточно умеренную (при среднем значении стоимости электроэнергии в России, равном 4,72 р./кВт·ч, стоимость потребленной энергии в месяц составит около 1070 р.).

ИИТ имеют нестабильный режим работы, характеризующийся в том числе широким диапазоном расхода дыма и его запыленности. Регулирование параметров электропитания рассмотренного однозонного электрофильтра с целью экономии электроэнергии сильно влияет на степень улавливания пыли. Это обусловлено тем, что функция зарядки частиц пыли и функция ее выведения из потока возложены на одно и то же поле. Во всем объеме однозонного электрофильтра создается электродинамическое поле, перенос зарядов между электродами вызывает относительно высокое энергопотребление. Уменьшение тока этого поля даже при низкой запыленности потока приводит к резкому снижению скорости дрейфа частиц в результате снижения степени их заряда. При этом основная зарядка частиц пыли производится на входе в электрофильтр, таким образом, наличие электродинамического поля в большей части объема электрофильтра является избыточным.

Двухзонные электрофильтры имеют отдельные поля для зарядки частиц и для их осаждения. Соответственно, возможно раздельное регулирование степени зарядки и степени осаждения частиц. Ограниченный по площади электродов ионизатор имеет относительно низкое энергопотребление при высокой степени зарядки частиц. Протяженный осадитель может иметь только электростатическое поле, требующее небольшой энергии. По существу, энергия поля осадителя тратится только на дрейф частиц в нем. Чем меньше запыленность потока, тем меньше затрачиваемая энергия.

Таким образом, в двухзонном электрофильтре происходит автоматическое регулирование затраченной энергии. Введение датчиков запыленности или гранулометрического состава пыли позволяет также осуществить и регулирование интенсивности работы ионизатора с целью разумного снижения его энергопотребления и выделения озона.

Заряженная в коронном разряде пыль, летящая с дымом, осаждается на осадительных электродах (рис. 4). Существует предельная толщина слоя пыли, при которой электрофильтр еще может продолжать стабильно работать. Как быстро будет достигнута эта толщина слоя, зависит от запыленности входящего дыма. Так, при запыленности 1 г/м^3 , учитывая площадь двух осадительных электродов нашего электрофильтра ($1,34 \text{ м}^2$) и насыпную плотность золы уноса ($0,7 \text{ г/см}^3$), за 1 ч работы осядет слой толщиной примерно 0,65 мм. Предельной толщиной слоя, начинающего своим отрицательным зарядом экранировать положительный заряд осадительного электрода, можно считать толщину, примерно равную 5 мм [15]. Такой слой при указанной запыленности будет достигнут за ~ 8 ч работы фильтра. Таким образом, аппарат может или очищаться периодически вручную, или иметь автоматическую систему очистки со сбором пыли в бункере путем встряхивания осадительных электродов.



Рис. 4. Фотография структуры осажденной пыли в лабораторном электрофильтре

Источник: фото С.В. Калашникова.

Заключение

На основании расчета было выяснено, что даже при степени очистки дыма электрофильтром 99 % его габариты будут вполне допустимыми для монтажа на частных котельных, например, взамен одной стандартной секции дымовой трубы. Как было показано, около 10 тыс. частных малых котельных г. Улан-Удэ выбрасывают в воздух до 7,5 тыс. т твердых частиц. Монтаж электрофильтров хотя бы на 50 % частных котельных, при указанной их степени улавливания, позволил бы снизить выбросы твердых частиц не менее чем на 3000–4000 т в год. Чтобы понять, насколько это много, можно рассмотреть следующую информацию: 1000 т золы при ее насыпной плотности 700 кг/м³ и при полном осаждении покроют площадь города 350 км² слоем в 4 мм.

Следует учитывать, что дровяные печи выбрасывают меньше твердых частиц и таких канцерогенов, как бензпирен, поэтому, несмотря на их большую долю в городе (77 %), именно рассмотренные угольные котлы обеспечивают львиную долю твердых выбросов. Выбросы в 2023 г. мелкодисперсных взвешенных частиц превысили ПДК в 4,7 раза³ [6], вместе с тем мероприятия по использованию электрофильтров в малых котельных дадут возможность привести к норме этот немаловажный фактор качества воздуха.

Однако оснащение даже 5000 частных котельных электрофильтрами довольно затруднительно, ибо ведет к дополнительным затратам домохозяйств и, вероятнее всего, возможно только при соответствующей инициативе местных органов власти. Приведем расчет примерной стоимости рассмотренного в проекте электрофильтра. Наиболее затратной статьей является источник питания с выходным напряжением 50 кВ и током до 7 мА. Для изготовления корпуса фильтра и осадительных электродов необходимо около 4,2 м² нержавеющей листовой стали, а также металлопрофили, метизы и изоляторы. Металлообработка, энергия, сборка, прибыль предприятия, накладные производственные расходы, включая заработную плату рабочим, — основная категория затрат, рассчитать которую достаточно трудно на данном этапе. Однако анализ показал, что стоимость электрофильтра, выпускающегося массово на одном из предприятий, уже специализирующихся на аналогичной продукции, может составлять не более 50 % стоимости твердотопливного котла, что хотя и затратно, но вполне позволительно ради дыхания чистым воздухом.

Такой электрофильтр может быть освоен, например, на ОАО «Улан-Удэнском приборостроительном производственном объединении», которое как раз освоило производство электрофильтров разработки ИФМ СО РАН для малых муниципальных котельных с производительностью по дыму 10–30 тыс. м³/ч.

³ Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Республики Бурятия в 2023 году» / Министерство природных ресурсов и экологии Республики Бурятия. Улан-Удэ, 2024. URL: <https://egov-buryatia.ru/mpr/files/%D0%93%D0%94%202023.pdf> (дата обращения: 24.01.2025).

Список литературы

- [1] Будилова Е.В., Лагутин М.Б. Загрязнение атмосферного воздуха и демографические показатели здоровья в городах России // Вестник Московского университета. Серия 23 : Антропология. 2021. № 4. С. 81–99. <https://doi.org/10.32521/2074-8132.2021.4.081-099> EDN: CRGERJ
- [2] Семикашиев В.В., Гайворонская М.С. Анализ текущего состояния и перспективы газификации России на период до 2030 г. // Проблемы прогнозирования. 2022. № 1. С. 91–100. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-190-91-100> EDN: TYKYLO
- [3] Бреславский А.С. «Пригородная революция» в региональном срезе (Улан-Удэ) // Крестьяноведение. 2017. Т. 2. № 1. С. 90–101. <https://doi.org/10.22394/2500-1809-2017-2-1-90-101> EDN: ZCINAV
- [4] Урбанова Ч.Б., Бабилов В.А., Петров С.А., Гомбоев Б.О. Особенности загрязнения воздушного бассейна в городе Улан-Удэ // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2022. Т. 16. № 3. С. 103–109. <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2022-16-4-103-109> EDN: JCXSJV
- [5] Урбанова Ч.Б., Бабилов В.А., Петров С.А., Гомбоев Б.О. Проблема загрязнения воздуха городской среды (на примере г. Улан-Удэ) // Природа внутренней Азии. 2022. № 4 (22). С. 133–137. <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2022-4-133-137> EDN: JFJXJW
- [6] Gomboev B.O., Dambueva I.K., Khankhareev S.S., Batomunkuev V.S., Zangeeva N.R., Tsydypov V.E., Sharaldaev B.B., Badmaev A.G., Zhamyanov D.Ts.-D., Bagaeva E.E., Madeeva E.V., Motoshkina M.A., Ayusheeva V.G., Rygzyrov T.S., Tsybikova A.B., Ayurzhanaev A.A., Sodnomov B.V., Banzaraktcaev Z.E., Alekseev A.V., Lygdenova A.B., Norboeva B.S. Atmospheric Air Pollution by Stationary Sources in Ulan-Ude (Buryatia, Russia) and Its Impact on Public Health // International Journal of Environmental Research and Public Health. Vol. 19. Iss. 24. Article no. 16385. <https://doi.org/10.3390/ijerph192416385> EDN: SKHZXT
- [7] Волкодаева М.В., Карелин А.О., Ломтев А.Ю., Канчан Я.С., Левкин А.В., Тимин С.Д. Учет выбросов загрязняющих веществ от автономных источников теплоснабжения индивидуальных жилых домов при проведении сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха для населенных пунктов // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102. № 2. С. 141–147. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-2-141-147> EDN: NYBMLX
- [8] Базаров А.Б., Баранов А.О., Павлов В.Н., Слепенкова Ю.М., Тагаева Т.О. Анализ и прогноз состояния окружающей среды Республики Бурятия в новых условиях // Мир экономики и управления. 2022. Т. 22. № 2. С. 36–53. <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2022-22-2-36-54> EDN: HOMIYP
- [9] Kubica R., Kiraga K., Jewiarz M., Pacura W., Domagala Ju., Tomasz M. Abating particulate emissions from small combustion installations: field testing of the micro-scale electrostatic precipitators // Applied Sciences (Switzerland). 2026. Vol. 16. No. 4. P. 2115. <https://doi.org/10.3390/app16042115> EDN: KLBWRG
- [10] Molchanov O., Krpec K., Horák J., Kuboňová L., Hopan F., Ryšavý J. Application and evaluation of electrostatic precipitation for control PM and NOx emissions from small-scale combustions // Fire. 2024. Vol. 7. No. 10. P. 356. <https://doi.org/10.3390/fire7100356> EDN: ASLSUX
- [11] Гузаев В.А., Троицкий А.А., Шастин С.Н. Реконструкция электрофильтров на базе современных технических решений // Экологический вестник России. 2012. Т. 7. С. 46–51. EDN: PCJCH
- [12] Xu X., Gao X., Yan P., Zhu W., Zheng C., Wang Y., Luo Z., Cen K. Particle migration and collection in a high-temperature electrostatic precipitator // Separation and Purification Technology. 2015. Vol. 143. P. 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.01.016>

- [13] *Jaworek A., Marchewicz A., Sobczyk A.T., Krupa A., Czech T.* Two-stage vs. single-stage electrostatic precipitators: comparison of collection efficiency for submicron particles // *Journal of Electrostatics*. 2019. Vol. 98. P. 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2019.02.004>.
- [14] *Chen B., Li H., He Yu., Liu B., Zhang L.* Study on performance of electrostatic precipitator under multi-physics coupling // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. P. 35023–35033. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06623-8> EDN: EUWCGK
- [15] *Holubčík M., Čajová Kantová N., Trnka J., Jandačka J.* Decreasing solid aerosols from small heat sources using the optimized electrostatic precipitator // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. No. 9. P. 1438. <https://doi.org/10.3390/atmos13091438> EDN: DGGWUR

Сведения об авторах:

Калашников Сергей Васильевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физической электроники и радиофизики, Институт физического материаловедения СО РАН, Российская Федерация, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6. ORCID: 0000-0003-3272-0072; eLIBRARY SPIN-код: 3164-6450. E-mail: betch_kail@mail.ru

Номоев Андрей Валерьевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физического материаловедения, Институт физического материаловедения СО РАН, Российская Федерация, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6. ORCID: 0009-0000-6201-6743; eLIBRARY SPIN-код: 2781-4995. E-mail: nomoevav@mail.ru

Чимытов Тимур Андреевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физического материаловедения, Институт физического материаловедения СО РАН, Российская Федерация, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6. ORCID: 0000-0003-3264-7792; eLIBRARY SPIN-код: 1183-1501. E-mail: tchimytov@gmail.com

Южаков Илья Андреевич, инженер лаборатории физического материаловедения, Институт физического материаловедения СО РАН, Российская Федерация, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6. ORCID: 0009-0001-8315-3656; eLIBRARY SPIN-код: 4217-1049. E-mail: yuzhakov.0402@yandex.ru

Самбуу Мунхцэцэг, исследователь, Департамент физики, Отдел естественных наук, Школа искусств и наук, Национальный университет Монголии, Монголия, 14201, г. Улан-Батор, район Баянгол, 11-й хороо (микрорайон), местность Баруун Тасган, д. 976. ORCID: 0009-0005-6169-5293. E-mail: munkhtsetseg_s@num.edu.mn

Цырен-Очир Соел-Эрденэ, профессор, Департамент инженерии окружающей среды и лесного хозяйства, директор Центра экологических технологий и развития, Школа инженерии и технологий, Национальный университет Монголии, Монголия, 14201, г. Улан-Батор, район Баянгол, 11-й хороо (микрорайон), местность Баруун Тасган, д. 976. ORCID: 0000-0002-6356-1361. E-mail: soyol_erdene@num.edu.mn