

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТНЫХ УСТРОЙСТВ ПО ВЗВЕШЕННЫМ ЧАСТИЦАМ PM2.5 И PM10, СОДЕРЖАЩИМСЯ В ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В статье рассмотрен вопрос по определению фракционной эффективности пылеулавливающих устройств по взвешенным частицам PM2.5 и PM10. Указана необходимость к применению данного метода, обусловленная повышенным риском мелкодисперсной пыли для здоровья и более серьезными гигиеническими нормативами по сравнению с общей пылью. Авторами проведены определение состава пыли и содержания фракций PM2.5 и PM10 для пылеулавливающего оборудования на входе и выходе, проведен анализ фактической эффективности по мелкодисперсной пыли, сравнение с эффективностью, указанной в паспортных данных. Определено, что фактическая эффективность для мелкодисперсной пыли может значительно отличаться от паспортных данных. Предложен метод определения фракционной эффективности пылеулавливающих устройств для мелкодисперсной пыли.

**Ключевые слова:** мелкодисперсная пыль, пылеулавливание, взвешенные частицы, PM2.5, PM10, эффективность пылеулавливания.

**Введение.** Взвешенные частицы (Particulate matters, PM) — обширный класс физически и химически разнообразных веществ (в жидком и твердом состоянии), частицы различной дисперсности которых находятся во взвешенном состоянии в воздухе. Некоторые частицы, такие как пыль, грязь, сажа или дым, достаточно крупные или имеют конкретный темный цвет, благодаря чему их можно увидеть невооруженным глазом. Другая их часть имеет значительно меньший размер и может быть различима лишь с применением электронного микроскопа. При этом, помимо непосредственного выброса, взвешенные частицы (ВЧ) могут быть образованы путем химических превращений газовых выбросов (оксиды азота, серы и др.). Эти частицы бывают разных размеров и форм и могут состоять из сотен различных химических веществ. Данная проблема изучалась с разных сторон как за рубежом [1–6], так и в России [7–9].

Основным опасным фактором взвешенных частиц является их размер — небольшие частицы диаметром 10 микрон и менее представляют наибольшую проблему ввиду того, что они могут проникнуть глубоко в дыхательные пути и легкие, в некоторых случаях — даже в кровеносную систему. ВЧ могут служить причиной возникновения сердечных приступов, астмы, аритмии, раздражения и различных заболеваний дыхательных путей.

Из-за малых размеров и веса ВЧ могут разноситься ветром на значительные расстояния, после чего они осаждаются на земную поверхность или в водоемы, посредством которых также оказывают негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека (изменение кислотности водоемов, изменение баланса питательных веществ в прибрежных водах и крупных речных бассейнах, снижение количества питательных веществ в почве и т.д.).

Наибольшую опасность для человека и окружающей среды представляют частицы PM<sub>2.5</sub>, эффективность очистки от которых для подавляющего количества применяемых агрегатов не установлена и принимается, как правило, по степени очистки от пыли общей (взвешенные вещества), что может искажать реальную ситуацию с содержанием мелкодисперсных частиц в приземном слое атмосферы.

**Постановка задачи.** Согласно [10], непосредственно наблюдение за содержанием в воздухе населенных пунктов взвешенных частиц диаметром 10 мкм и 2,5 мкм (PM<sub>10</sub> и PM<sub>2.5</sub> соответственно) проводятся в России только в восьми городах на 13 постах, при этом данные наблюдений в Улан-Удэ показывают, что среднемесячные значения концентраций PM<sub>10</sub> и PM<sub>2.5</sub> в течение почти всего года (кроме июля-августа) превышают установленные нормативы ПДК<sub>с.с.</sub>, в других городах — преимущественно ниже ПДК<sub>с.с.</sub>. В большей части городов непосредственное наблюдение за уровнем взвешенных частиц не осуществляется.

Газоочистное оборудование (ГОУ), применяемое для улавливания взвешенных частиц (пылеулавливающие агрегаты, циклоны и т.п.), обычно характеризуется общей эффективностью (по всему дисперсному составу пылей) очистки или же эффективностью очистки ВЧ определенного размера. К примеру, пылеулавливающий агрегат ПУ-1500 производства ЗАО «СовПлим», согласно паспорту, имеет эффективность очистки не менее 92 % для частиц диаметром от 5 мкм, а циклон с обратным конусом ЦОК-11 имеет общую эффективность 80 %, при этом эффективность очистки от частиц PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub> может быть значительно ниже заявленной паспортом ГОУ.

Соответственно, целью нашей работы является инструментальное определение фактической эффективности применяемых в практике ГОУ по двум фракциям — PM<sub>10</sub> и PM<sub>2.5</sub>.

**Теория.** Определение эффективности пылеулавливающих установок возможно произвести с помощью метода лазерной дифракции. Лазерная дифракция — широко применяемая технология анализа размеров частиц, подходящая для материалов, размер частиц которых составляет от сотен нанометров до нескольких миллиметров. Определение распределения частиц по размерам методом лазерной дифракции основано на измерении углового распределения интенсивности рассеянного света при прохождении лазерного луча через диспергированный образец. Крупные частицы преимущественно рассеивают свет под малыми углами к лазерному пучку, тогда как мелкие частицы — под большими углами.

Весь процесс определения фактической эффективности очистки по различным пылевым фракциям можно разделить на пять этапов:

1. Отбор проб пыли на входе и выходе пылеулавливающей установки.
2. Определение массы частиц пыли каждой пробы гравиметрическим методом.
3. Измерение функции объёмного распределения частиц по размерам методом лазерной дифракции.
4. Расчёт объёмной доли частиц и массовой концентрации в заданном диапазоне.



Рис. 1. Аспиратор ПУ-3Э



Рис. 2. Пробоотборная трубка в сборе

5. Расчёт фактической эффективности пылеулавливающей установки по различным фракциям частиц.

**Эксперимент.** Для отбора проб пыли использовались: аспиратор ПУ-3Э (рис. 1), фильтры АФА-ХП-20-2, фильтродержатель ИРА-20-2, пробоотборная трубка и набор пробоотборных наконечников (рис. 2).

Для соблюдения изокINETического отбора, в зависимости от запылённости и скорости потока в газоходе, подбирается наконечник, высчитывается скорость и время отбора проб. Для точности результатов в каждой точке отбирается не менее трех проб. Далее фильтры с отобранной пылью подвергаются взвешиванию и рассчитывается средняя масса пыли для каждой точки отбора. После чего фильтры с отобранной пылью помещались в 1,4-диоксан, данная процедура требуется для перевода частиц пыли в суспензию, после чего можно приступать к измерению функции объёмного распределения частиц по размерам.

Измерение функции объёмного распределения частиц по размерам проводится с использо-



Рис. 3. Лазерный дифракционный анализатор размеров частиц SALD-2300

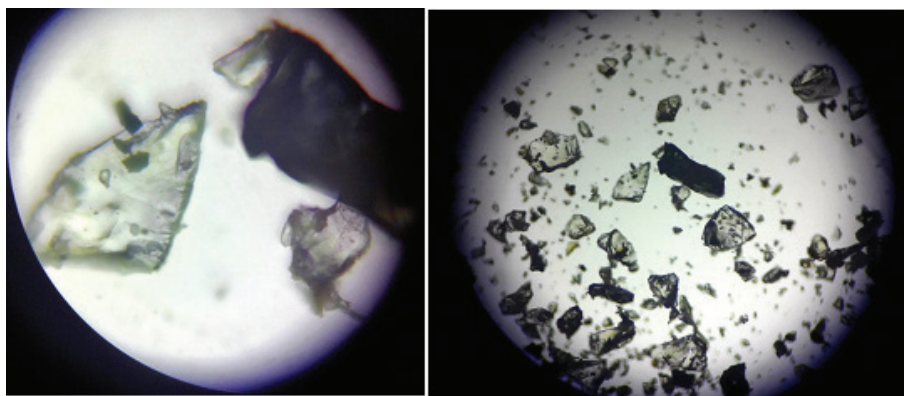


Рис. 4. Пыль металлическая

ванием лазерного дифракционного анализатора размеров частиц SALD-2300 (рис. 3).

Лазерный дифракционный анализатор размеров частиц SALD-2300 предназначен для измерений в диапазоне от 17 нм до 2500 мкм. В результате данного анализа были получены фракционное распределение частиц и их объемные доли. Результаты представляются в виде дифференциальной и интегральной зависимости.

Оценка эффективности проводилась на следующих установках:

1. Пылеулавливающий агрегат ПУ-1500 (ЗАО «СовПлим»).

2. Циклон с обратным конусом ЦОК-11.

Пылеулавливающий агрегат ПУ-1500 (ПУ) выпускается в соответствии с ТУ 3646-009-05159840-2003 и предназначен для очистки сухих воздушных потоков от различных видов не слипающейся и не волокнистой средне- и крупнодисперсной пыли в цехах предприятий различных отраслей промышленности. Эффективность очистки от пыли дисперсностью от 5 мкм не менее 92 %. Общая эффективность — до 99 %. ПУ — это агрегат с двухступенчатой очисткой воздуха:

— первая ступень — инерционная. За счет расширения сечения при входе в фильтр воздушный поток значительно снижает свою скорость и направляется перпендикулярно первоначальному направлению, а более тяжелые частицы пыли вылетают из потока воздуха и оседают в накопительный бункер;

— вторая ступень — механическая. Пыль улавливается тканевыми рукавными фильтрами.

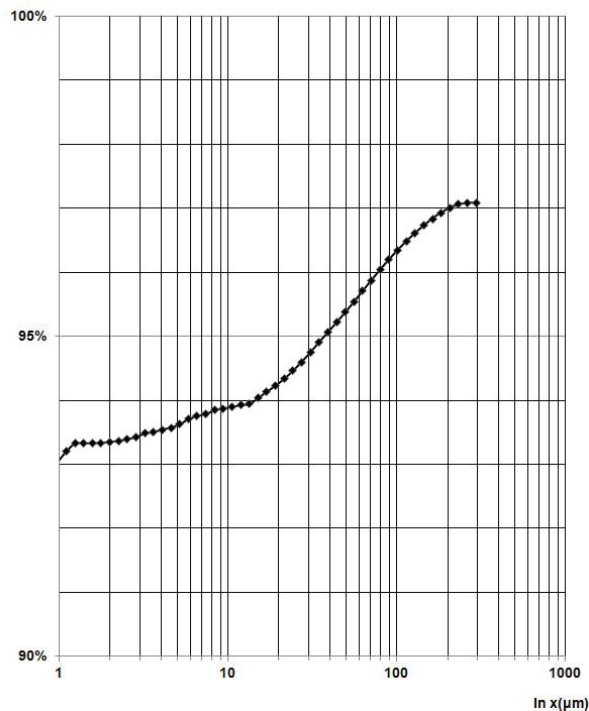
Зависимость эффективности очистки от дисперсности  $\eta, \%$ 

Рис. 5. Зависимость эффективности очистки от дисперсности пыли, ПУ-1500

Циклон ЦОК-11 предназначен для очистки выбросов от пыли с повышенными абразивными свойствами. Циклон ЦОК-11 состоит из корпуса с входным патрубком, внутреннего конуса, выхлопной трубы и пылесборника. Очистка воздуха от пыли осуществляется под действием центробежных сил. Очищенный воздух отводится через выхлопную трубу, а пыль через кольцевую щель между нижней частью расширяющегося конуса корпуса и внутренним конусом попадает в бункер или пылесборник с выдвижным ящиком. Освободившийся от пыли воздух возвращается обратно в корпус циклона через центральное отверстие внутреннего конуса.

Во всех случаях загрязняющим веществом являлась пыль металлическая. На рис. 4 представлен снимок пыли под микроскопом.

**Обсуждение эксперимента.** Результаты анализа пылеулавливающего агрегата ПУ-1500.

В результате взвешивания проб пыли получены следующие данные:

1. Общая концентрация пыли на входе составила  $C_{\text{общ}} = 76,47 \text{ мг/м}^3$ .

2. Общая концентрация пыли на выходе составила  $C_{\text{общ}} = 2,22 \text{ мг/м}^3$ .

3. Концентрация пыли диаметром 2,5 мкм на входе составила  $C_{2,5} = 2,25 \text{ мг/м}^3$ .

4. Концентрация пыли диаметром 10 мкм на входе составила  $C_{10} = 13,7 \text{ мг/м}^3$ .

5. Концентрация пыли диаметром 2,5 мкм на выходе составила  $C_{2,5} = 0,136 \text{ мг/м}^3$ .

6. Концентрация пыли диаметром 10 мкм на выходе составила  $C_{10} = 0,85 \text{ мг/м}^3$ .

Общая эффективность очистки составила 97 %.

Эффективность очистки от пыли менее 10 мкм составила 93,9 %.

Эффективность очистки от пыли менее 2,5 мкм составила 93,4 %.

Полученный график зависимости эффективности очистки от дисперсности пыли представлен на рис. 5.

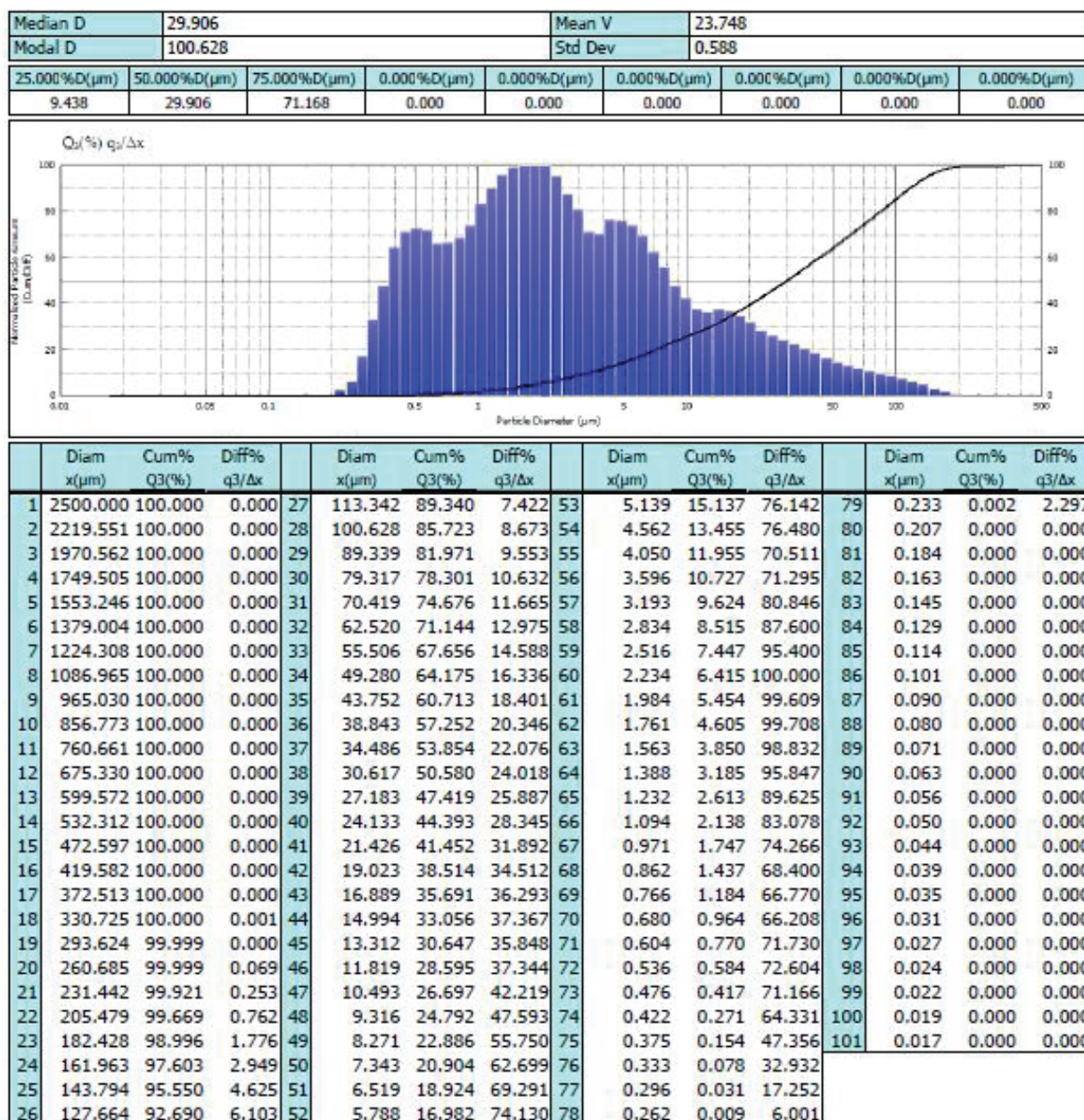


Рис. 6. Результаты анализа проб на входе, ЦОК-11

Результаты анализа пылеулавливающего агрегата Циклон ЦОК-11.

В результате взвешивания проб пыли получены следующие данные:

Общая концентрация пыли на входе составила  $C_{\text{общ}} = 183,3 \text{ мг/м}^3$ .

Общая концентрация пыли на выходе составила  $C_{\text{общ}} = 6,54 \text{ мг/м}^3$ .

Результаты измерения дисперсного состава проб пыли на входе в циклон и на выходе из циклона представлены на рис. 6 и 7 соответственно. На рисунках представлены таблицы распределения частиц по размеру и их объемные доли, а также дифференциальная и интегральная зависимости.

Концентрация пыли диаметром 2,5 мкм на входе составила  $C_{2,5} = 13,73 \text{ мг/м}^3$ .

Концентрация пыли диаметром 10 мкм на входе составила  $C_{10} = 49,2 \text{ мг/м}^3$ .

Концентрация пыли диаметром 2,5 мкм на выходе составила  $C_{2,5} = 4,34 \text{ мг/м}^3$ .

Концентрация пыли диаметром 10 мкм на выходе составила  $C_{10} = 6,28 \text{ мг/м}^3$ .

Общая эффективность очистки составила 96,5 %.

Эффективность очистки от пыли менее 10 мкм составила 87,2 %.

Эффективность очистки от пыли менее 2,5 мкм составила 68,4 %.

Полученный график зависимости эффективности очистки от дисперсности пыли представлен на рис. 8.

**Вывод.** Полученные данные дают возможность не только увидеть фракционный состав пыли, но и позволяют рассчитать эффективность пылеулавливающего оборудования в зависимости от размера частиц. Инструментальное определение фактической эффективности пылеулавливающих устройств в зависимости от размеров пыли позволяет более точно оценивать возможное влияние мелкодисперсных взвешенных частиц, отдельно от общей пыли,

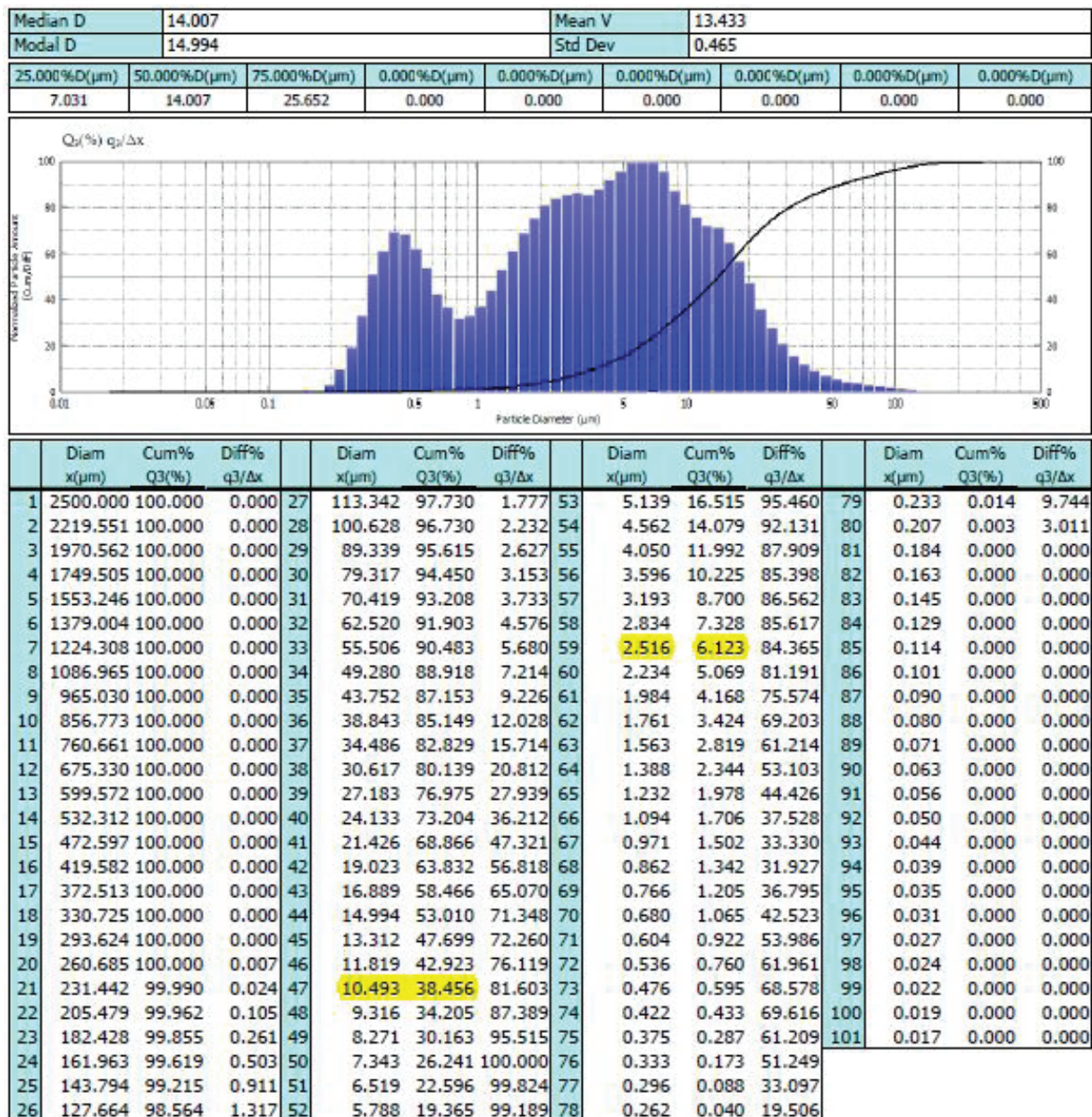
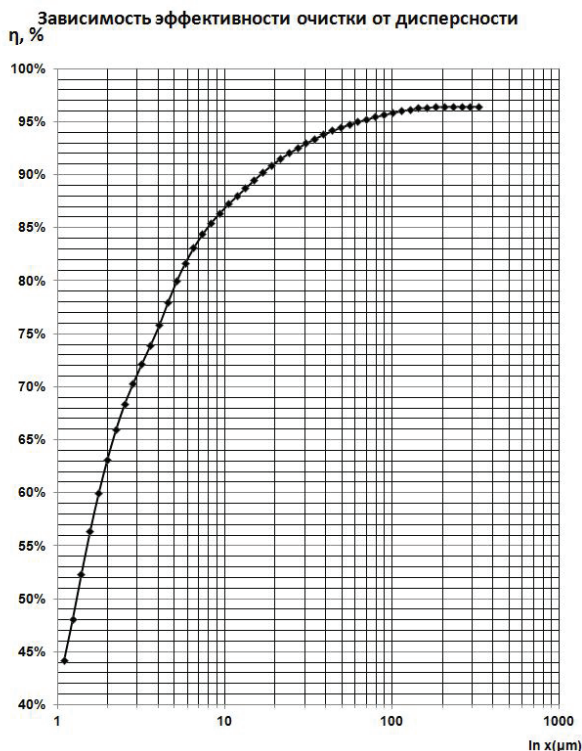


Рис. 7. Результаты анализа проб на выходе, ЦОК-11



**Рис. 8. Зависимость эффективности очистки от дисперсности пыли, ЦОК-11**

так как установленные гигиенические нормативы для PM10 и PM2.5 значительно отличаются от нормативов для пыли общей (взвешенные вещества) — ПДК<sup>PM10</sup> = 0,3 мг/м<sup>3</sup>, ПДК<sup>PM2.5</sup> = 0,16 мг/м<sup>3</sup>, ПДК<sup>м.п.</sup><sub>с.с.</sub> = 0,5 мг/м<sup>3</sup>; ПДК<sup>м.п.</sup><sub>с.с.</sub> = 0,06 мг/м<sup>3</sup>, ПДК<sup>с.с.</sup><sub>с.с.</sub> = 0,035 мг/м<sup>3</sup>, ПДК<sup>с.с.</sup><sub>с.с.</sub> = 0,15 мг/м<sup>3</sup>.

#### Библиографический список

- Anderson J. O., Thundiyil J. G., Stolbach A. Clearing the Air: A Review of the effects of particulate matter air pollution on human health // Journal of Medical Toxicology. 2012. Vol. 8, no. 2. P. 166–175.
- Fu M., Zheng F., Xu X. [et al.]. Advances of study on monitoring and evaluation of PM2.5 pollution // Meteorology and Disaster Reduction research. 2011. Vol. 34, no. 4. P. 1–6.
- Gualtieri M, Ovreik J, Mollerup S. [et al.]. Airborne urban particles (Milan winter-PM2.5) cause mitotic arrest and cell death: Effects on DNA, mitochondria, AhR binding and spindle organization // Mutation Research. 2011. Vol. 713 (1-2). P. 18–31. DOI: 10.1016/j.mrfmmm.2011.05.011.
- Kim Ki-H., Kabir E., Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter // Environment International. 2015. No. 74. P. 136–143. DOI: 10.1016/j.envint.2014.10.005.
- Fang W., Yang Y., Xu Z. PM10 and PM2.5 and health risk assessment for heavy metals in atypical factory for cathode ray tube television recycling // Environmental Science & Technology. 2013. Vol. 47 (21). P. 12469–12476. DOI: 10.1021/es4026613.
- Risom L., Moller P., Loft S. Oxidative stress-induced DNA damage by particulate air pollution // Mutation Research. 2005. Vol. 592 (1-2). P. 119–137.
- Чистяков Я. В., Епархин О. М., Володин Н. И. Мелкодисперсная пыль — техногенная угроза биосфере // История и перспективы развития транспорта на севере России. 2014. № 1. С. 155–158.

- Лаврентьева Н. Е., Вакурова Н. В., Азовскова Т. А. Пыль производственной среды, как фактор риска развития профессиональной патологии респираторной системы // Терапевт. 2014. № 5. С. 30–32.
- Чомаева М. Н. Промышленная пыль и здоровье человека // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2014. Т. 3, № 8. С. 37–40.
- Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2017 г.: ежегодник // Научно-техническая литература, изданная в организациях Росгидромета в 2018 г. СПб.: ГГО, 2018. 234 с.

**ШТРИПЛИНГ Лев Оттович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Промышленная экология и безопасность».

SPIN-код: 9285-8565  
 AuthorID (РИНЦ): 157285  
 ORCID: 0000-0002-2622-9108  
 AuthorID (SCOPUS): 56504001800  
 ResearcherID: T-8953-2018  
 Адрес для переписки: los@omgtu.ru

**БАЖЕНОВ Владислав Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность».

SPIN-код: 9288-9566  
 AuthorID (РИНЦ): 646727  
 ORCID: 0000-0003-3749-166X  
 AuthorID (SCOPUS): 56503305700  
 ResearcherID: M-6511-2018  
 Адрес для переписки: bvv36@yandex.ru

**КАЛИНИН Юрий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность».

SPIN-код: 7828-3231  
 AuthorID (РИНЦ): 206450  
 ORCID: 0000-0002-7773-0058  
 Адрес для переписки: ukalinin.conference@gmail.com

**БАЖЕНОВА Наталья Сергеевна**, аспирантка, ассистент кафедры «Промышленная экология и безопасность».

SPIN-код: 7666-3205  
 ORCID: 0000-0002-0983-746X  
 AuthorID (SCOPUS): 57200725159  
 ResearcherID: M-6532-2018  
 Адрес для переписки: n.s.v91@mail.ru

**МЕРКУЛОВ Василий Васильевич**, аспирант, ассистент кафедры «Промышленная экология и безопасность».

SPIN-код: 5478-3524  
 AuthorID (РИНЦ): 834906  
 ORCID: 0000-0001-9062-1297  
 ResearcherID: O-7758-2016  
 Адрес для переписки: mvv055@mail.ru

#### Для цитирования

Штриплинг Л. О., Баженов В. В., Калинин Ю. В., Баженова Н. С., Меркулов В. В. Метод определения эффективности очистных устройств по взвешенным частицам PM2.5 и PM10, содержащимся в пылевых выбросах промышленных предприятий // Омский научный вестник. 2019. № 3 (165). С. 66–71. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-165-66-71.

Статья поступила в редакцию 29.04.2019 г.  
 © Л. О. Штриплинг, В. В. Баженов, Ю. В. Калинин,  
 Н. С. Баженова, В. В. Меркулов