

**Лабораторные и производственные испытания нового
персонального пылемера, измеряющего концентрацию
респирабельной пыли в реальном масштабе времени**
Laboratory and Field Performance of a Continuously Measuring Personal Respirable Dust Monitor

Отчёт о проведении исследования, № 9669

Report of Investigations 9669

Авторы: Джон Волквейн, Роберт Винсон, Стивен Пейдж, Линда Мак-Вильямс,
Джеральд Джой, Дональд Тачман, Стивен Михлер

By Jon C. Volkwein, Robert P. Vinson, Steven J. Page, Linda J. McWilliams, Gerald J. Joy, Steven E. Mischler, and Donald P. Tuchman

Министерство здравоохранения и социальных служб США
Центры по профилактике и сдерживанию заболеваний
Национальный институт охраны труда
Исследовательская лаборатория NIOSH в Питтсбурге

*Department of Health and Human Services
Centers for Disease Control and Prevention
National Institute for Occupational Safety and Health
Pittsburgh Research Laboratory*

[DHHS \(NIOSH\) Publication No. 2006-145](#)

Питтсбург, Пенсильвания

Сентябрь 2006

Как получить документы:

Копии документов Национального института охраны труда (NIOSH) и другую информацию по вопросам охраны труда и техники безопасности Вы можете получить, обратившись в NIOSH по адресу:

4676 Columbia Parkway Cincinnati, OH 45226-1998

Факс: 513-533-8573 Телефон: 1-800-35-NIOSH (1-800-356-4674) e-mail: pubstaft@cdc.gov

Интернет-сайт: www.cdc.gov/niosh

Результаты и выводы исследования, описанные в этом отчёте, не являются официальной позицией NIOSH.

Правовая оговорка: упоминание любой компании или продукции не означает, что это одобрено NIOSH. Кроме того, ссылки на веб-сайты, вне сайта NIOSH, не означают, что Институт одобряет использование продукции или программ этих организаций. Институт не несёт ответственности за информацию, содержащуюся на таких сайтах.

Содержание

<i>Предисловие к переводу</i>	3
Введение	3
Описание нового пылемера PDM	5
Конструкция устройства	5
Движение воздуха, отбираемого для проведения измерений	6
Измерение и регулирование расхода воздуха	7
Источник питания	7
Обработка результатов измерений	7
Способ измерения массы пыли с помощью датчика TEOM	7
Компенсация моментов позволила добиться миниатюризации	8
Методы	8
Лабораторные методы	8
<i>Камера для имитации запылённой атмосферы</i>	9
<i>Измерительные приборы</i>	9
Новый персональный пылемер PDM	9
Гравиметрический (эталонный) пылемер	10
Импакторы	10
<i>Точность гравиметрического анализа (взвешивания)</i>	10
<i>Планирование проведения исследования</i>	11
<i>Испытание аккумулятора нового пылемера</i>	12
<i>Проверка правильности значения коэффициента массы у нового пылемера</i>	12
Значение коэффициента массы	12
Определение коэффициента массы	13
<i>Анализ</i>	13
Подробные испытания в шахтах	14
<i>Критерии для выбора шахт для проведения испытаний</i>	14
<i>Порядок проведения измерений</i>	15
<i>Замеры запылённости воздуха рабочей зоны</i>	16
<i>Техобслуживание и записи об использовании</i>	16
<i>Анализ точности измерений в производственных условиях</i>	16
Результаты	17
Лабораторная проверка точности	17
<i>Проверка точности перед применением пылемеров в шахтах</i>	17
<i>Проверка точности после применения пылемеров в шахтах</i>	18
Точность	19
<i>Калибровка для установления коэффициента K₀</i>	20
<i>Порог чувствительности и предел количественного определения</i>	20
<i>Влияние разрядки аккумулятора</i>	21
Подробные испытания нового пылемера в шахтах	22
<i>Работоспособность (новых пылемеров) во время всего исследования</i>	22
<i>Расширенные испытания в шахтах</i>	23
<i>Надёжность работы новых пылемеров</i>	23
<i>Точность измерений в подземных условиях</i>	25

Обсуждение	26
Погрешность измерений прибора	26
Точность	26
Обучение и отзывы	27
Представление информации на экране	28
Проблемы при использовании нового пылемера	29
Файлы с результатами измерений.	29
<i>Скачивание файлов</i>	29
<i>Интерпретация</i>	31
Самодиагностика нового пылемера	31
<i>Сведения о параметрах работы и их интерпретация</i>	31
<i>Различение достоверных результатов измерений от недостоверных</i>	32
Техническое обслуживание	33
Калибровка	34
<i>Расход воздуха</i>	34
<i>Масса пыли на фильтре</i>	34
Выводы	35
Благодарности	35
Приложение А. Подробная информация об измерениях концентрации пыли в шахтах с помощью нового пылемера PDM	36
Приложение В. Подробная информация об отборе проб воздуха в шахтах с помощью стационарного пробоотборника	38
Приложение С. Анализ причин негативных результатов измерения концентрации респираторной пыли в угольных шахтах в период 1995-2004г	39
Литература	41

Иллюстрации

1. Конструкция нового пылемера PDM	4
2. Новый персональный пылемер PDM (версия, выпущенная изготовителем до начала продаж), присоединённый к белому блоку (слева), объединяющему зарядное устройство и обеспечивающему связь с персональным компьютером через интерфейс обмена RS-232	5
3. Замена фильтра на датчике нового пылемера PDM с помощью специального приспособления	6
4. Лабораторный стенд для испытания пылемеров (новых, PDM, и их сравнения с обычными, эталонными)	11
5. Испытания работоспособности пылемера при разрядке аккумулятора (до полной остановки), индикатор нормальной работы – правильный расход воздуха	23
6. Отображение результатов измерений и вычислений на дисплее нового пылемера PDM	31
7. Пример распечатки результатов измерений	33
8. Подробная запись измерения запылённости (к которому относится распечатка на Фиг. 7)	34
9. Ошибка при измерении массы уловленной пыли, возникающая из-за перекрытия прохода воздуха по воздуховоду, и последующего восстановления движения воздуха	36

Таблицы

1. Описание шахт, в которых проводилось исследование, и положение измерителя запылённости воздуха рабочей зоны	15
2. Результаты измерений, выполненных (в лаборатории) перед началом применения нового пылемера в шахтах	19
3. Результаты измерений точности новых пылемеров PDM после их использования в шахтах, и соответствующие результаты измерений стандартного гравиметрического пылемера	20
4. Результаты вычислений точности измерений новых пылемеров по результатам лабораторных испытаний, до и после проверки в шахтах	21
5. Сравнение значений коэффициента K ₀ у пылемеров PDM, заложенного в программное обеспечение, и измеренное при проведении испытаний	22
6. Общее число замеров, выполненных во время подробного исследования в шахтах, и число успешных (достоверных) замеров	24
7. Итоговая информация о применении новых пылемеров и их ремонте (техобслуживании)	26
8. Количество и доля успешно выполненных замеров	27
9. Результаты измерений в производственных условиях – точность	28
10. Проблемы при использовании нового пылемера, и комментарии.	32
11. Информация о калибровках по расходу воздуха	37

Сокращения

ANOVA - *analysis of variance* – анализ изменчивости, [дисперсионный анализ](#);

BMRC - *British Medical Research Council* – Британский совет по медицинским исследованиям;

CL - *confidence limit* – [доверительный интервал](#);

CMDPSU - *coal mine dust personal sampler unit* – персональный пылемер (обычный, гравиметрический), предназначенный для измерения концентрации респираторной (мелкодисперсной) фракции угольной пыли;

DO - *Dorr-Oliver* – одна из моделей миниатюрного [циклона](#)-пылеуловителя, используемая для отделения крупной фракции пыли от респираторной (мелкой) при замерах запылённости, т.к. законодательство США требует измерения концентрации именно респираторной (мелкой) пыли;

EOS - *end of shift* – конец смены;

GSD – [geometric standard deviation](#) – стандартное геометрическое отклонение;

HD - *Higgins-Dewell* – одна из моделей маленького пылеуловителя – [циклона](#), используемого для отделения крупной пыли от респираторной, т.к. законодательство США требует измерения концентрации именно её;

HEPA - *high-efficiency particulate air (filters)* – [противоаэрозольные фильтры высокой эффективности](#); в ЕС и РФ примерно соответствуют фильтрам респираторов P3;

ISO - *International Organization for Standardization* - [Международная организация по стандартизации](#) (ИСО);

LED - *light-emitting diode* – [светодиод](#);

LOQ - *limit of quantification* – предел количественного определения ([предел обнаружения](#));

MMAD - *mass median aerodynamic diameter* – аэродинамический диаметр – это размер эквивалентный частицы сферической формы из материала с плотностью 1000 кг/м³, которая эквивалентной данной частице (одинаковая скорость оседания под действием силы тяжести и т.п.); а при наличии частиц разного размера – средний массовый геометрический диаметр;

MO - *mass offset* – погрешность измерения массы уловленной пыли;

MRE - *Mining Research Establishment (U.K.)* - Горный научно-исследовательский центр (Национального Совета по углю, Великобритания);

MSHA - *Mine Safety and Health Administration* – [Управление по безопасности и охране труда при добыче полезных ископаемых](#) (в Министерстве труда США), разрабатывает требования к работодателям в части охраны труда, и контролирует их выполнение;

NIOSH - *National Institute for Occupational Safety and Health* – [Национальный институт охраны труда](#) (в Министерстве здравоохранения США, далее – *Институт – прим.*), проводит исследования в области профилактики несчастных случаев и профзаболеваний, разрабатывает рекомендации к работодателю для их профилактики (проекты законов) – но не принимает законы, и не контролирует их выполнение;

PDM - *personal dust monitor* – новая модель персонального пылемера, позволяющая получать сведения о текущей концентрации пыли и дозе воздействия с начала смены – в реальном масштабе времени, изготавливается модели [PDM3600](#) и [PDM3700](#), стоимость в 2015г (до массового выпуска) ~14 000 долларов;

PEL - *permissible exposure limit* – [предельно допустимая концентрация](#) (вредного вещества или фиброгенной пыли), которая разработана [OSHA](#), и юридически является обязательной для выполнения работодателем;

PRL - *Pittsburgh Research Laboratory (NIOSH)* – исследовательская лаборатория Института в Питтсбурге;

PVC - *polyvinyl chloride* – [поливинилхлорид](#);

RH - *relative humidity* – [относительная влажность](#);

RMSE - *root mean square error* – средняя квадратическая ошибка;

RSD - *relative standard deviation* – относительное стандартное отклонение;

TE - *tapered element* – трубообразный (колеблющийся, с фильтром на конце) элемент датчика запылённости;

TEC - *Thermo Electron Corp. (Albany, NY)* – компания, изготавливавшая новые пылемеры;

TEOM - *tapered-element oscillating microbalance* – микровесы с колеблющимся трубообразным чувствительным элементом;

UCL - *upper confidence limit* – верхний доверительный предел.

Единицы измерения

(сокращения, использованные в этом документе)

hr - *hour* – час;

in - *inch* – [дюйм](#), 1 дюйм = 2,54 см;

kg - *kilogram* – килограмм;

L/min - *liter per minute* – литров в минуту;

lb - *pound* – [фунт](#), 1 фунт равен 0,4536 кг;

mg – *milligram* – миллиграмм;

mg/m³ - *milligram per cubic meter* – миллиграмм на кубический метр;

min - *minute* – минута;

mm – *millimeter* – миллиметр;

mm Hg - *millimeter of mercury* – [миллиметр ртутного столба](#), 1 мм рт ст соответствует давлению 133,2 Па;

sec - *second* – секунда;

µg - *microgram* – микрограмм;

µm - *micrometer* – микрометр;

EC - *degree Celsius* – [градус Цельсия](#);

EF - *degree Fahrenheit* – [градус Фаренгейта](#)
(EC = (EF-32)*5/9 ; EF = 1,8*EC + 32).

Лабораторные и производственные испытания нового персонального пылемера, измеряющего концентрацию респираторной пыли в реальном масштабе времени

Laboratory and Field Performance of a Continuously Measuring Personal Respirable Dust Monitor

Отчёт о проведении исследования, № 9669

Report of Investigations 9669

Авторы: Джон С. Волквейн¹, Роберт П. Винсон², Стивен Дж. Пейдж³, Линда Дж. Мак-Вильямс⁴, Джеральд Дж. Джой⁵, Дональд П. Тачман⁵, Стивен Е. Михлер⁶ (Jon C. Volkwein, Robert P. Vinson, Steven J. Page, Linda J. McWilliams, Gerald J. Joy, Donald P. Tuchman, Steven E. Mischler)

1 – исследователь-физик (*research physical scientist*); 2 – физик (*physicist*); 3 – исследователь-физик (*research physicist*); 4 – статистик (*statistician*); 5 – промышленный гигиенист (*industrial hygienist*); и 6 – физик (*physical scientist*).

Питтсбургская исследовательская лаборатория Национального института охраны труда; Питтсбург, Пенсильвания.
Pittsburgh Research Laboratory, National Institute for Occupational Safety and Health, Pittsburgh, PA.

Предисловие к переводу

Добыча полезных ископаемых нередко сопровождается загрязнением воздуха пылью из-за несовершенства используемых технологических процессов, машин, износа оборудования, и из-за недостаточного внимания работодателя к сбережению здоровья рабочих. Но вдыхание даже нетоксичной, инертной пыли может привести к развитию неизлечимых и необратимых заболеваний – пневмокониозов (антракоз, силикоз и др.). В СНГ это происходит на фоне разрушения системы профилактики профессиональных заболеваний, созданной в СССР; неблагоприятной экономической ситуации; и продолжающейся с 1930-х не-регистрации большей части профзаболеваний^{III}. Это приводит к закономерным последствиям: Так, по данным руководителя Ростовского центра профпатологии Ирины Пиктушанской († 05.2015), процесс инвалидизации шахтёров ускорился – теперь это происходит через 4 месяца после постановки первичного диагноза, а не через 20 лет, как было в 1960-е. Срок дожития шахтёров после постановки диагноза профзаболевания за полвека (вопреки прогрессу науки) тоже сократился – с 38 до 4 лет в среднем^{II}.

Министерство труда РФ принимает различные меры для защиты рабочих от вредных производственных факторов. На смену аттестации рабочих мест АРМ, которую игнорировало большинство работодателей, пришла специальная оценка условий труда. В отличие от АРМ, она позволяет работодателю улучшить условия труда за счёт выдачи рабочим средств индивидуальной защиты СИЗ (то есть – не меняя сами условия труда), а закупка СИЗ может быть оплачена за счёт отчислений работодателя в Фонд социального страхования. Это делает спецоценку более привлекательной для работодателя, и возможно, надежда снизить классы труда (а заодно – отчисления и другие обременительные для бизнеса расходы) стимулирует проводить такую спецоценку чаще, чем проводилась АРМ.

При этом работодатель обязан обеспечивать рабочих эффективными и сертифицированными СИЗ, соответствующими условиям труда. В отношении СИЗ органов дыхания (респираторов, СИЗОД) – это требование у шахтёров скорее нарушается, чем выполняется. Если при подземной добыче полезных ископаемых запылённость может превышать 1 грамм/м³^{III}, и часто составляет сотни мг/м³, то необходимы респираторы, снижающие запылённость вдыхаемого воздуха в сотни раз. Исследования показали, что такую эффективность могут обеспечить изолирующие СИЗОД с принудительной подачей воздуха под лицевую часть по потребности под давлением (так, чтобы во время вдоха давление было выше наружного для исключения просачивания неотфильтрованного воздуха через зазоры между маской и лицом); или фильтрующие СИЗОД с принудительной подачей воздуха под полнолицевую маску^{III}. Но на практике шахтёрам выдают полумаски без принудительной подачи воздуха – самые неэффективные из всех респираторов.



На основании многочисленных научных исследований, правительством США требует, чтобы работодатель не применял полумаски при превышении ПДК более чем в 10 раз (то есть КЗ = 10).

Купленная одним из олигархов яхта, не используемая для санаторно-курортного лечения горнорабочих

Результаты исследований эффективности СИЗОД (и западных - на рабочих местах (обзор¹⁵), так и лабораторных исследований советских моделей¹⁶), показавших низкие защитные свойства полумасок – игнорируются. Игнорируется и то, что шахтёры не могут применять респираторы непрерывно, что по определению не позволяет обеспечить их эффективную защиту при большой запылённости с помощью СИЗОД. В то время, как в развитых странах законодательство однозначно определяет порядок выбора и организации использования респираторов (достаточно эффективных при своевременном использовании); в РФ изготовители необоснованно завышают эффективность своей продукции на порядки – см. фото полумаски Artrix выше). Сочетание использования малоэффективных СИЗОД и большой концентрации пыли создаёт недопустимо высокий риск развития профзаболеваний.

С другой стороны, воздействие нетоксичной (фиброгенной) пыли на шахтёров ограничено санитарными правилами как максимальная **среднесменная** концентрация, и для определения условий труда нужно измерять именно её. Но на сайте Госреестра средств измерений в 2015г не было ни одного устройства, способного проводить длительные замеры во взрывоопасной атмосфере. (Такие пробоотборные электрические насосы есть, но изготовители не сертифицировали их – в РФ). Отсутствие измерителей среднесменной концентрации мешает контролировать условия труда, определять эффективность средств коллективной защиты и мешает улучшать условия труда.

Может быть, ознакомление с передовым зарубежным опытом - поможет найти пути улучшения защиты шахтёров от пыли. В настоящем переводе описана часть исследований персонального пылемера, разработанного для шахтёров-угольщиков США. Прибор определяет массовую концентрацию пыли (без учёта химического состава) в реальном масштабе времени, что позволяет оперативно выявлять увеличение воздействия пыли, устанавливать причину увеличения, и своевременно принимать корректирующие меры. По данным доклада¹⁷ руководителя MSHA Джо Мэйна, в законодательство внесены изменения, и с февраля 2016г все компании, добывающие уголь под землёй, обязаны использовать эти пылемеры для определения воздействия пыли на всех шахтёров, работающих в наиболее пыльных местах¹⁸.

Хотя описанный прибор измеряет концентрацию не всей, а респираторной пыли, и при достаточно низкой запылённости, можно заметить, что существуют технические возможности измерять таким же способом более высокие концентрации всей пыли. Подача воздуха в микровесы без предварительной очистки циклоном позволит улавливать всю пыль (не только респираторную), а уменьшение расхода воздуха и/или включение подачи воздуха периодически - уменьшит массу пыли на фильтре даже при сильно загрязнённой атмосфере. Отсутствие циклона может позволить использовать недорогой мембранный насос, и снизит сопротивление потоку. В сочетании с уменьшением объёма прокачиваемого воздуха это снизит потребление энергии, и позволит облегчить и удешевить аккумуляторы.

Но такая возможность пока не реализована. В то время как работодатели в США, в соответствии с требованиями национального законодательства, обеспечивают своих шахтёров пылемерами стоимостью более 20 тыс \$, их коллеги в РФ предпочитают тратить деньги на покупку яхт – вовсе не для санаторно-курортного лечения тех шахтёров, у которых пневмокониоз и силикоз перешли в лёгочное сердце. Это отличие отчасти может объясняться незначительной долей регистрируемых профзаболеваний, и конфликтом интересов – сохранение жизни и здоровья свидетелей приватизации потенциально может быть невыгодно тем, кто сумел эффективно расхитить народнохозяйственную собственность СССР. Остаётся надеяться, что государство перестанет игнорировать свои регулирующие обязанности, и станет более эффективно стимулировать работодателей улучшать условия труда.

Ссылки к предисловию

- [П1.](#)** *Измеров Н.Ф., Кириллов В.Ф. - ред.* Гигиена труда. — Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2010. — С. 13-14 — 2000 экз. — ISBN 978-5-9704-1593-1.
- [П2.](#)** *Пиктушанская Ирина Николаевна* Поводов для критики не убавилось // Группа изданий «Охрана труда и социальное страхование» Медицина труда и экология (под обложкой журнала «Охрана труда. Практикум»). — Москва: 2013. — № 2. — С. (71-77).
- [П3.](#)** *Дрёмов А.В.* Обоснование рациональных параметров обеспыливания в комбайновом проходческом забое: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.26.01 / [Место защиты: МГГУ]
- [П4.](#)** *Nancy Bollinger ed.* [NIOSH Respirator Selection Logic](#). — NIOSH. — Cincinnati, OH: National Institute for Occupational Safety and Health, 2004. — 32 p. — (DHHS (NIOSH) Publication No 2005-100). Перевод: [PDF Wiki](#)
- [П5.](#)** *Кириллов ВФ, Филин АС, Чиркин АВ* Обзор результатов производственных испытаний средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) (ru) // ФБУЗ "Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ" Роспотребнадзора [Токсикологический Вестник](#). — Москва: 2014. — № 6. — С. 44-49. — ISSN 0869-7922. — DOI:10.17686/sced_rusnauka_2014-1034 [PDF Wiki](#)
- [П6.](#)** *Голінько В.І., Наумов М.М., Чеберячко С.І., Радчук Д.І.* Дослідження захисної ефективності вітчизняних одноразових протипилових респіраторів за європейськими стандартами. [Металургическая и горнорудная промышленность](#) (2011), № 5 с. 118-121
- [П7.](#)** [Announcement today at U.S. House of Representatives oversight hearing - over 41,000 respirable dust samples show how mines can meet new dust rule](#) 23 апреля 2015г.
- [П8.](#)** A Rule by the Mine Safety and Health Administration on 05/01/2014. Lowering Miners' Exposure to Respirable Coal Mine Dust, Including Continuous Personal Dust Monitors. [C. Summary of Major Provisions](#)

Реферат

Национальный институт охраны труда (NIOSH, далее в тексте – Институт – прим.), в сотрудничестве с промышленностью, профсоюзами, а также Управлением по охране труда при добыче полезных ископаемых (*Mine Safety and Health Administration, MSHA*) разработал и исследовал новый вид измерительного оборудования – персональный пылемер (*personal dust monitor, PDM*). Это устройство интегрировано в лампу на шахтёрской каске, и непрерывно даёт информацию о концентрации респираторной угольной пыли в зоне дыхания рабочего. Для того, чтобы подтвердить обеспечиваемую точность измерений – как после получения от изготовителя, так и после того, как они использовались шахтёрами на рабочих местах - была проведена лабораторная проверка 25 прототипов таких пылемеров в лабораторных условиях. Эта лабораторная проверка подтвердила ранее полученные результаты: измеренные этими пылемерами концентрации находятся в пределах 95% доверительного предела при допуске погрешности $\pm 25\%$ по отношению к «базовому» значению. Испытания на рабочих местах, в шахтах, позволили определить точность и надёжность пылемера, и то, как к нему относятся шахтёры. Эти результаты показали, что в таких условиях погрешность составляет: относительное стандартное отклонение 0,078% у пылемера PDM; и 0,052% у (используемого сейчас) стандартного персонального пылемера. (Испытания показали, что) этот пылемер даёт достоверную информацию о запылённости с вероятностью 90% в течение более чем 8000 часов работы под землёй. Краткие отзывы шахтёров об устройстве показывают, что они считают его более удобным в применении, чем стандартный пылемер, так как новое устройство встроено в используемую шахтёрами лампу на каске. Средние значения погрешности измерений, полученные до и после испытаний на рабочих местах (под землёй) оказались статистически равными. Было проведено дополнительное исследование для сопоставления нового пылемера с аналогичным английским прибором (*U.K. Mining Research Establishment sampler*) как это требует законодательство США. Однако при увеличении концентрации (обнаружилась) изменчивость, и это потребовало использования более сложных статистических методов, что затруднило проведение анализа результатов измерений. Результаты этой работы, и их объяснение будут описаны в следующей публикации. При использовании нового пылемера в разнообразных производственных условиях, охваченных этой работой, устройство показало себя как такой же точный, надёжный и удобный измеритель запылённости, как и уже используемый сейчас стандартный пылемер.

Введение

Измерение концентрации пыли в воздухе на рабочем месте, по существу, является первым шагом на пути профилактики (неизлечимых и необратимых) заболеваний органов дыхания, развивающихся при вдыхании чрезмерного количества пыли. Закон об охране труда на угольных шахтах 1969г (*Federal Coal Mine Health and Safety Act of 1969*), принятый перед аналогичным законом 1977г (*Federal Mine Safety and Health Act of 1977*), обязывает (работодателя) обеспечить среднесменную запылённость не более 2 мг/м³ по респираторной фракции угольной пыли (*по данным специалистов, одновременно измеривших концентрации и респираторной, и всей пыли в угольных шахтах Великобритании, концентрация всей пыли в среднем в 5-20 раз выше, чем концентрация респираторной пыли – прим.*), а также проводить измерения концентрации пыли. Сейчас (2006г) для определения запылённости используется персональный пылемер (*coal mine dust personal sampler unit CMDPSU*), которые прокачивают воздух шахты через пробоотборный фильтр. Затем уловленная респираторная пыль отправляется для анализа в лабораторию. Результаты анализа становятся известными на шахте через несколько дней после проведения замеров (или иногда – через несколько недель). После длительных попыток разработать пылемеры, которые бы измеряли концентрацию пыли непрерывно с помощью определения рассеивания света [Williams and Timko 1984]¹ (стационарное устройство), а также персонального пылемера [Kissell and Sacks 2002]², министр труда США и комитет, занимающийся профилактикой пневмокониозов у шахтёров-угольщикиков (*Federal Advisory Committee on the Elimination of Pneumoconiosis Among Coal Mine Workers* [U.S. Department of Labor 1996]³), дали указание Институту (NIOSH) начать исследования для улучшения оборудования, используемого для измерения запылённости в шахтах. После консультации с профсоюзами, промышленностью и правительством, Институт заключил контракт (*CDC contract 200–98–8004*) с компанией *Rupprecht and Patashnick Co., Inc.* (сейчас - *Thermo Electron Corp., TEC*, находится в Албани, штат Нью-Йорк), на разработку персонального пылемера (*personal dust monitor PDM*). Этот пылемер разрабатывался на основе (уже имевшегося) устройства для определения качества воздуха, который широко использовался для мониторинга. Важной особенностью этого прибора было то, что он измерял массу пыли на фильтре, не

учитывая (химический) состав пыли, размер частиц, и их физические свойства. Выполнение работы по этому контракту позволило создать миниатюрный датчик, и разместить его в прототипе персонального пылемера, который давал точный результат измерений (уже) к концу смены (*end-of-shift (EOS) data*) [Volkwein et al. 2004]⁴. Результаты проверки в лабораторных условиях показали, что для угольной пыли разных видов, при разном дисперсном распределении частиц, этот прибор измерял запылённость с погрешностью $\pm 25\%$ с вероятностью 90% (по отношению к «базовому» значению). Результаты испытаний в шахтах показали, что статистически-значимых отличий в показаниях нового прибора и уже используемых пылемеров – нет. При проведении испытаний в шахтах, новая технология позволила получить успешные результаты в течение 108 смен, при попытках провести замеры в 115 случаях. Испытания в шахтах показали, что новый пылемер удобен в использовании, устойчиво работает, даёт точные и своевременные результаты, позволяющие контролировать запылённость, и предотвращать чрезмерное воздействие пыли, и что им легко пользоваться.

Получив обнадеживающие результаты испытаний прототипа пылемера как в лабораторных, так и в производственных условиях, Управление по охране труда при добыче полезных ископаемых (MSHA) в июне 2003г заявило, что оно приостановит все работы, относящиеся к завершению законотворческой деятельности, регулирующей защиту от пыли (проект был опубликован в марте 2003г), и сосредоточит усилия на ускорении исследований нового пылемера PDM [MSHA 2003]⁵. Другие партнёры, участвовавшие в разработке пылемера (профсоюзы и промышленность) внесли вклад в разработку проекта испытаний (для оценки того, подходит ли прибор для использования в угольных шахтах; надёжен ли он при повседневном применении; и удобен ли он для применения шахтёрами). В другой части документа предписывается определить точность, чувствительность (*accuracy*), функциональность и работоспособность при длительном использовании прототипа пылемера – как в лабораторных условиях, так и в шахтах.

В настоящем документе описано изучение двух из трёх главных проверяемых параметров. Первый – лабораторная проверка того, что точность измерения пылемера, который будет выпускаться для продажи, соответствует точности прототипа прибора; и проверка сохранения точности пылемера после его применения в условиях шахт. Второй – проверка точности в подземных условиях как нового, так и уже используемого пылемеров, и импактора (используемого для определения дисперсного распределения частиц пыли). Тщательная проверка в подземных условиях также позволит определить технические характеристики пылемера при его повседневном использовании шахтёрами. Третий – определение того, соответствует ли новый пылемер требованиям английского стандарта (*U.K. Mining Research Establishment MRE*) и международного стандарта (*International Organization for Standardization ISO*) к приборам, используемым в шахтах. Проверка соответствия английскому и международному стандартам оказалась значительно сложнее, чем предполагалось изначально; и потребовала использования более сложной статистической модели, чем планировалось. Поэтому Институт (NIOSH) решил опубликовать уже выполненную часть работы в настоящем документе, а остальную – опубликовать в другом.

Для оценки риска развития профессиональных заболеваний, возникающих при вдыхании пыли, важно определить массу респираторной (мелкодисперсной, наиболее опасной) фракции пыли. Международный стандарт ISO [1995]⁶ рекомендует использовать определение того, какая часть пыли респираторная, в соответствии с работой Soderholm [1989]⁷. Но поскольку нет ни одного сепаратора респираторной фракции, который бы абсолютно точно соответствовал указанной рекомендации, любое устройство будет давать результат измерений с какой-то присущей ему погрешностью. Например, широко используемый сепаратор респираторной пыли – циклон Дорр-Оливер диаметром 10 мм, используемый в настоящее время в стандартном персональном пылемере *CMDPSU* – даёт погрешность как по отношению к международному стандарту, так и по отношению к английскому (*British Medical Research Council BMRC*) [Bartley et al. 1994]⁸. Определение респираторной фракции пыли, разработанное BMRC, стало применяться и в MRE как показатель опасности пыли для здоровья рабочего. Для использования в составе нового пылемера, сепаратор респираторной пыли должен был соответствовать тому условию, что он будет устанавливаться на каску. Был выбран циклон конструкции (*Higgins-Dewell HD*). Его первоначальные испытания показали, что он даёт небольшую погрешность по отношению к международному стандарту ISO [Maynard and Kenny 1995]⁹.

В этом отчёте описаны принцип работы, конструкция и технические характеристики нового пылемера, и приводится его сравнение со стандартным традиционным гравиметрическим методом измерения запылённости; и функциональность устройства при его применении шахтёрами. Особое внимание уделено оценке точности измерений до и после его использования в шахтах, и точности в подземных условиях.

Описание нового пылемера PDM

В настоящем отчёте описан вариант пылемера, который разработан и испытан, но который (*пока ещё – 2006г – прим.*) не поступает в продажу. Это изделие (*Model 3600 PDM*) работает точно так же, как и прототип пылемера, разработанный ранее по контракту. Отличие испытывавшегося пылемера от прототипа: более прочный корпус, улучшенный индикатор показаний, более эффективное управление потреблением энергии, улучшенное программное обеспечение. Этот пылемер разрабатывался с тем, чтобы устройство стало «практически незаметным» для шахтёра, и заменялось бы при плановой замене лампы на каске и аккумулятора, используемых сейчас большинством шахтёров.

Точное взвешивание уловленной пыли осуществляется с помощью специальных микровесов с колеблющимся чувствительным элементом (*tapered-element oscillating microbalance TEOM*). Эти микровесы позволяют пылемеру PDM получать результат измерений в реальном масштабе времени [Patashnick and Rupprecht 1991]¹⁰. Аналогичные микровесы используются для определения массы пыли в атмосфере, в выхлопных газах дизельных двигателей, измерения запылённости воздуха в воздуховодах. Используемый метод измерений, основанный на использовании инерции уловленной пыли, позволяет получить результат, который по порогу чувствительности измерения соответствует наиболее чувствительным лабораторным микровесам. При разработке такого устройства, предназначенного для использования в составе пылемера в сложных и тяжёлых подземных условиях, пришлось решить ряд проблем. После многолетних усилий был разработан чувствительный элемент, который устанавливался на специальном основании, компенсирующем удары, и позволяющим обеспечить взвешивание уловленной пыли с точностью до микрограмм в сложных подземных условиях.

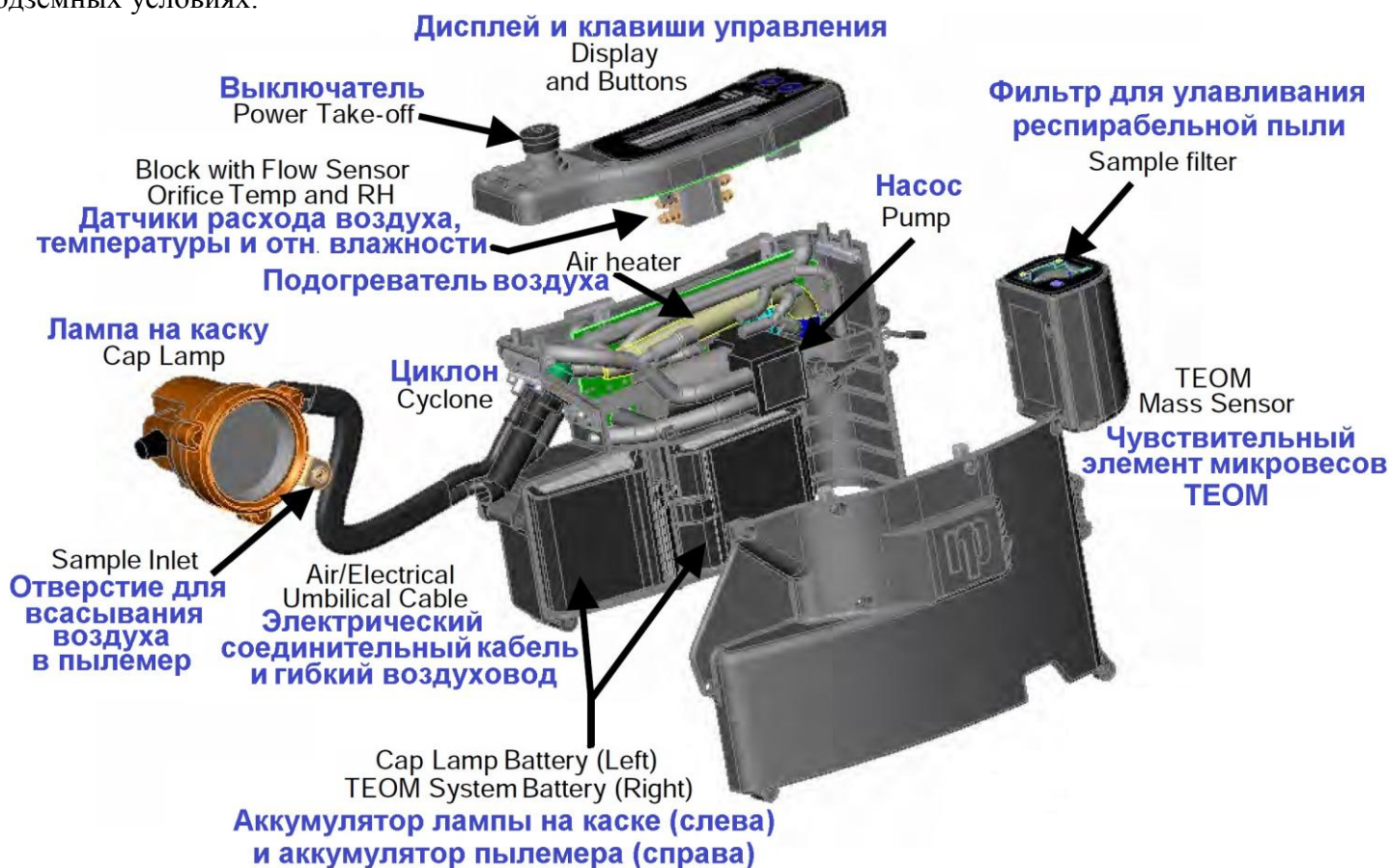


Figure 1.—PDM internal components.
Фиг. 1. Конструкция пылемера PDM

Конструкция устройства

Пылемер фактически является сочетанием шахтёрской лампы и измерителя концентрации респираторной пыли. По весу и размерам он примерно соответствует используемым сейчас свинцовому аккумулятору и шахтёрской лампе. Пылемер состоит из трубки для отбора проб воздуха, циклона – сепаратора крупной (не-респираторной) пыли, воздухонагревателя, измерителя массы пыли, аккумулятора для питания пылемера, аккумулятора для питания шахтёрской лампы, электронного блока управления и запоминания, индикатора показаний, и программного обеспечения на основе Windows (называется

WinPDM; обеспечивает подключение к компьютеру). На Фиг. 1 показаны некоторые из этих компонент. Прочность корпуса пылемера увеличили, чтобы он выдержал условия подземного применения; и теперь устройство соответствует требованиям к прочности шахтёрских ламп при падении (*MSHA drop test requirements for cap lamps; 30 CFR 77 Code of federal regulations. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, Office of the Federal Register*), а также требованиям к безопасности (30 CFR 18).

В новом пылемере также имелся разъём, позволяющий подключать его к персональному компьютеру для скачивания результатов измерений и внесения изменений в программное обеспечение; и одновременно заряжать аккумулятор прибора для следующей смены (Фиг. 2).



Фиг. 2. Новый персональный пылемер PDM (версия, выпущенная изготовителем до начала продаж), присоединённый к белому блоку (слева), объединяющему зарядное устройство и обеспечивающему связь с персональным компьютером через интерфейс обмена RS-232.

Движение воздуха, отбираемого для проведения измерений

Запылённый воздух угольной шахты всасывается во входное отверстие воздуховода для отбора воздуха, находящееся около лампы на козырьке каски. Затем воздух движется по гибкому воздуховоду к циклону-сепаратору HD, который установлен на входе в прибор. Циклон улавливает крупную пыль, пропуская мелкую – такую, которая при вдыхании может дойти до лёгких (респираторную). Пройдя через зону подогрева (что позволяет избежать конденсации влаги), воздух с респираторной пылью попадает на датчик измерения массы пыли. При прохождении воздуха через этот датчик, установленный на нём заменяемый фильтр улавливает (респираторную) пыль. Этот фильтр может заменяться механиком, обслуживающим пылемеры (Фиг. 3) в конце каждой смены, при очистке прибора.



Фиг. 3 (справа). Замена фильтра на датчике нового пылемера PDM с помощью специального приспособления

Измерение и регулирование расхода воздуха

После датчика измерения массы пыли, отфильтрованный воздух проходит через отверстие, и измеряется перепад давления при прохождении потока воздуха через это сужение. Измеренный перепад давления позволяет определить расход воздуха. В приборе также установлены датчики, измеряющие температуру и относительную влажность воздуха (до насоса). Их показания учитываются при управлении производительностью насоса так, чтобы обеспечить то разрежение, которое необходимо для корректного отбора проб воздуха. Другие датчики измеряют температуру воздуха вблизи циклона, а также давление воздуха в шахте. Эта информация используется прибором вместе со сведениями о температуре (отбираемого) потока воздуха около отверстия (расходомера) для определения (фактического) расхода воздуха через циклон HD. Полученная информация используется в системе обратной связи для того, чтобы расход воздуха через циклон был постоянным (2,2 л/мин), что обеспечит правильное разделение крупнодисперсной пыли и респираторной пыли, в конкретных подземных условиях.

Источник питания

Для электропитания пылемера и шахтёрской лампы используются два одинаковых аккумулятора. Их хватает на 12 часов работы как пылемера, так и лампы. Полностью разряженные аккумуляторы могут быть заряжены за 6 часов, что позволит использовать индикатор показаний прибора в максимальной степени. В приборе использованы новые аккумуляторы, использующие литий-ионную технологию (также используемую в персональных компьютерах), что обеспечивает большую ёмкость при небольшом размере, и хорошие характеристики в отношении времени зарядки и жизненного цикла. Благодаря большой ёмкости таких аккумуляторов при небольшом их размере, удалось разместить все аккумуляторы и сам пылемер в корпусе, соответствующем по размеру стандартному аккумулятору для шахтёрской лампы. Масса пылемера, который мы испытывали, составила 3 кг (6,6 фунтов).

Обработка результатов измерений

Информация с датчиков, включая датчик массы уловленной пыли, поступала в микропроцессор в реальном масштабе времени. Это позволяло получать сведения о запылённости воздуха в зоне дыхания шахтёра с ежеминутным усреднением. Результаты измерений могут отображаться в реальном масштабе времени как в цифровом, так и в графическом виде. Также прибор измеряет параметры окружающей среды – температуру и давление воздуха, и перемещение прибора. Информация о концентрации пыли и параметрах окружающей среды сохраняется в памяти прибора порядка 20 полных смен. Эта информация может быть выбрана и скачана с прибора для анализа. В верхней части прибора находится дисплей с подсветкой, который непрерывно показывает информацию о концентрации пыли за предшествующие 30 минут, кумулятивную (среднюю с начала смены) массовую концентрацию пыли, и прогнозируемую среднесменную концентрацию пыли (к концу смены). С помощью дисплея шахтёр может оценить запылённость в любой момент времени, и эффективность пылезащитных мероприятий.

Информация о концентрации пыли и параметрах окружающей среды всегда доступна для шахтёра, но она защищена от искажения (фальсификации), так как доступ к ней ограничен. Кроме того, прибор может использоваться и шахтёрами, и административными работниками для кратковременных измерений концентрации пыли – таких, которые не повлияют на статистические показатели по полносменным замерам. Эта возможность может быть полезна при измерении эффективности различного вентиляционного или пылезащитного оборудования. Такие (внутри-сменные) замеры могут проводиться так часто, как это необходимо, а результаты таких измерений могут быть скачаны вместе защищёнными от фальсификаций результатами измерений запылённости в течение смены.

Способ измерения массы пыли с помощью датчика ТЕОМ

Главным элементом конструкции датчика измерения концентрации пыли ТЕОМ является полая трубка (*tapered element TE*). Один конец этой трубки закреплён, а другой конец может совершать колебания. На свободном (не закреплённом) конце трубки устанавливается сменный фильтр, который улавливает мелкодисперсную (респираторную) пыль из потока проходящего через трубку воздуха. Специальное электронное оборудование, расположенное по бокам от трубки, побуждает её совершать колебания с постоянной амплитудой и с частотой, равной частоте собственных колебаний (резонансной). По мере накопления пыли на фильтре его масса возрастает, а частота собственных колебаний снижается. Это позволяет определить массу пыли на фильтре без погрешностей, возникающих из-за разнообразия размеров частиц пыли, их формы и физико-химических свойств.

Новый пылемер определяет массовую концентрацию респираторной пыли в шахте (путём измерения изменения частоты собственных колебаний датчика, и измерения расхода воздуха, прошедшего через фильтр за период измерения). Отображаемые индикатором значения концентрации пыли (выраженные в мг/м³) обновляются каждые несколько секунд. Для калибровки датчика (получения константы (K_0), которая определяет взаимосвязь между изменением массы на конце датчика (TE) и изменением частоты) изготовитель пылемера использует стандарты (измерения) массы, соответствующие (*traceable to*) *National Institute of Standards and Technology*.

Масса фильтра вычисляется каждые 5 секунд по формуле:

$$MT_0 = K_0 \times \{ 1/f_c^2 + 1/f_i^2 \} \quad (1)$$

где

MT_0 = масса;

K_0 = константа, учитывающая свойства датчика (TE);

f_c = частота колебаний в момент измерения (текущая);

f_i = исходная частота колебаний, в начале смены.

Коэффициент массы определяется по массе, времени, и расходе воздуха через прибор. Порядок проведения вычислений более подробно описан в руководстве по эксплуатации изготовителя [Rupprecht and Patashnick Co. 2004]¹¹.

Компенсация моментов позволила добиться миниатюризации

Ранее подобные измерители запылённости (ТЕОМ) были слишком громоздкими и хрупкими для того, чтобы их можно было использовать в персональных пылемерах [Williams and Vinson 1986]¹². Возможность использования этой технологии в персональных шахтёрских пылемерах появилась тогда, когда удалось разработать миниатюрный датчик ТЕОМ. Разработка миниатюрного датчика позволило сделать специальную запатентованную конструкцию, позволяющую компенсировать моменты изделия. Компенсатор моментов, входящий в состав пылемера PDM, совершает колебания (с дополнительной массой на конце) с той же частотой, что и датчик запылённости – но в противофазе с ним. (Вследствие этого) датчик запылённости ведёт себя так, словно он закреплён на массивной опоре – но без использования тяжёлого основания. Можно привести аналогию – у музыкального камертона два, а не один свободно колеблющийся «рог». Использование второго колеблющегося элемента компенсирует усилия (моменты), создаваемые первым, так как они колеблются в противофазе с одинаковой частотой и амплитудой. Скомпенсированность моментов позволяет шахтёру разворачивать основание измерительного инструмента, не влияя при этом на движение чувствительного элемента (датчика/камертона), и он будет звучать длительное время. А если сделать камертон с одним «рогом», то он не будет звучать долго, если его не закрепить на массивном основании, и крепление не должно создавать значительных потерь энергии в системе.

При использовании этого принципа потери энергии от датчика (TE) в окружающую среду при соответствующей конструкции компенсатора моментов можно свести к нулю. (Это) позволяет резко уменьшить массу и размеры пылемера без какого-то ухудшения его характеристик. Кроме того, уменьшение размеров датчика значительно уменьшает расход энергии на подогрев (воздуха – для предотвращения образования конденсата).

Методы

Лабораторные методы

Для подтверждения точности измерений у «предпродажной версии» нового пылемера 3600 PDM, были проведены лабораторные исследования приборов как после получения изготовителя, так и после проведения серий измерений в подземных условиях. Используя опубликованные критерии для методов анализа [Kennedy et al. 1995]¹³, Институт показал, что для прототипа нового пылемера PDM: «погрешность результатов измерения у конкретного прибора находятся в пределах $\pm 25\%$ с доверительной вероятностью 95%», и что (они) соответствуют верхнему 95% доверительному пределу [Volkwein et al. 2004]¹⁴. В предпродажной версии пылемера 3600 PDM использовались те же самые методы измерения массы пыли, что и в прототипе, и те же самые алгоритмы, и (поэтому) подробное проведение проверки точности не было оправдано. Но чтобы подтвердить (ожидаемую) точность измерений было проведено ограниченное число проверок – у каждого из всех новых приборов.

Камера для имитации запылённой атмосферы

Для того, чтобы сравнить работу разных измерительных приборов-пылемеров, использовалась лабораторная (пылевая) камера *Marple*, позволявшая обеспечивать стабильные и хорошо контролируемые условия проведения измерений [Marple and Rubow 1983]¹⁵. Камера обеспечивала концентрацию пыли от 0,2 до 4 мг/м³. Эти диапазоны концентраций соответствовали диапазонам концентраций, рекомендованным в документе Института (*NIOSH's Guidelines for Air Sampling and Analytical Method Development and Evaluation*) [Kennedy et al. 1995]¹⁶. Эти величины были взяты в качестве ориентира, так как они позволяли получать такую (навеску) пыли, которая позволяет сделать высококачественный анализ. В качестве эталонного измерителя использовался гравиметрический пылемер. При уменьшении концентрации пыли менее 0,5 мг/м³, как показало исследование [Kogut et al. 1997]¹⁷ относительное стандартное отклонение (*relative standard deviation RSD*) у пылемеров значительно возрастает. Поэтому, для увеличения точности базового (эталонного) метода измерения запылённости, при концентрации пыли менее 0,5 мг/м³, число замеров было увеличено. Для создания запылённости в пылевой камере использовали уголь из Питтсбургского угольного пласта; уголь (размалывался мельницей) *Alpine AFG Model 100 jet mill* (изготовитель *Hosokawa Micron Powder Systems, Summit, NJ*). Для подачи в воздух камеры используется генератор пыли с псевдооживленным слоем, и с нейтрализатором электрических зарядов (изготовитель *TSI, Inc., St. Paul, MN*). Температура в камере поддерживалась в пределах 20-25°C, а относительная влажность между 40 и 60%. Приборы устанавливались в камере на поворотную опору, которая вращалась с частотой 1-2 оборота в минуту. Это позволяет не проводить рандомизированное планирование экспериментов, и гарантировало, что воздействие (пыли) по каждому из радиусов на каждый из пылемеров будет одинаковым. Для измерения концентрации пыли в камере использовали имевшейся в продаже пылемер *Model 1400a TEOM* (изготовитель *TEC, Albany, NY*). Его показания использовали для того, чтобы подобрать подходящие интервалы времени для получения необходимого количества пыли на фильтрах пылемеров.

Измерительные приборы

Чувствительность и точность измерения нового пылемера PDM сравнивалась со средними значениями (результатов измерений эталонным методом) – гравиметрических измерений. От компании-изготовителя TEC было получено 25 приборов PDM. Для гравиметрического анализа использовали гравиметрические измерители – циклоны BGI-4CP с встроенными держателями для фильтров (изготовитель *BGI, Inc., Waltham, MA*). Циклоны и фильтры присоединяли к персональному пробоотборному *насосу MSA Escort ELF* (изготовитель *MSA Co., Inc., Pittsburgh, PA*). Устройство циклона BGI-4CP соответствовало циклону HD, идентичному установленному в новый пылемер. И новый пылемер PDM, и циклоны BGI-4CP использовались при расходе воздуха 2,2 л/мин. Для снижения изменчивости при проведения измерений, измеритель BGI-4CP был модифицирован: вход воздуха в прибор осуществлялся через трубку, идентичную используемую в новом пылемере PDM.

Новый персональный пылемер PDM

В пылемере PDM использовался фильтровальный материал *TX40H120WW* (изготовитель *Pallflex Products Corp., Putnam, CT*) (в виде диска) диаметром 15 мм, с тефлоновым покрытием. Фильтровальный материал изготавливался в виде фильтра, закреплённого в пластиковой кассете. Кассета устанавливалась на конец чувствительного элемента (ТЕ) датчика запылённости. Использовался тот же самый фильтровальный материал, который использовался в измерителе концентрации пыли в воздухе *TEC Model 1400a*. Расход воздуха через пылемер PDM проверялся, и при отклонении более чем на $\pm 1\%$ (0,022 л/мин) прибор калибровался повторно. Результаты измерений расхода воздуха через каждый из приборов, и результаты калибровок записывались. Для анализа стабильности расхода воздуха у пылемера использовали результаты (измерений) у 10 пылемеров, у которых имелась полная информация обо всех измерениях расхода и калибровках.

Очистка пылемеров PDM проводилась в конце каждого дня, когда проводили замеры. Для очистки снимали бункер циклона-сепаратора крупной пыли, и фильтр с чувствительного элемента датчика запылённости ТЕ. (Затем) канал воздуховода продувался сжатым воздухом, в направлении от входного отверстия у шахтёрской лампы к циклону; от бункера циклона к циклону; и от чувствительного элемента датчика ТЕ назад к циклону. Затем с помощью сжатого воздуха очищали бункер циклона, и канал чувствительного элемента ТЕ. После этого на чувствительный элемент устанавливали новый фильтр; на циклон устанавливали бункер для пыли, и собирали пылемер.

Гравиметрический (эталонный) пылемер

У эталонного гравиметрического пылемера использовался циклон BGI-4CP и присоединённый к нему мембранный фильтр из поливинилхлорида диаметром 37 мм с порами диаметром 5 мкм. Перед проведением каждой серии измерений проводили калибровку персонального пробоотборного насоса MSA ELF. Для калибровки использовали расходомер Gilibrator (изготовитель Sensidyne, Inc., Clearwater, FL) так, чтобы насос обеспечивал расход $2,2 \pm 0,022$ л/мин через гравиметрические (эталонные) измерители BGI-4CP. При калибровке насоса использовали (приспособление), создающее перепад давления, эквивалентный создаваемому пробоотборным устройством.

Импакторы

(Импактор – устройство для определения распределения частиц пыли по размерам, состоит из серии отверстий разного диаметра. Воздух проходит через крупные отверстия с относительно небольшой скоростью, и струя ударяется о липкую подложку. Затем воздух проходит через меньшие отверстия с большей скоростью, и ударяется о подложку. Отличие в скоростях определяет отличие с улавливанием частиц пыли, а сравнение массы пыли на разных подложках позволяет определить распределение по размерам – прим.)

Для определения распределения частиц пыли в камере по размерам использовался персональный каскадный импактор Marple (Model 290, изготовитель TEC, Franklin, MA). Для прокачивания через него воздуха $2,0 \pm 0,02$ л/мин применяли персональный пробоотборный насос ELF Escort. Устройство использовали в соответствии с указаниями изготовителя, включая (применение) поправочных коэффициентов для учёта осаждения пыли во входном отверстии и на стенках [Rubow et al. 1987]¹⁸.

У использовавшегося импактора было 8 ступеней, которые по «пороговой эффективности» (*cut points*) соответствовали улавливанию частиц пыли с разным диаметром, от 0,52 до 21,3 мкм. После инерционных улавливающих ступеней воздух прокачивался через фильтр (из поливинилхлорида PVC, диаметром 37 мм, размер пор 5 мкм). На каждой из ступеней импактора струйки воздуха ударялись о подложку Mylar® диаметром 34 мм в шести местах (для столкновения). Для предотвращения отскока частиц от подложки, места соударения струек воздуха с ней покрывали (вязкой липкой не высыхающей) смазкой. Смазку наносили только на места соударения, для чего использовали металлический шаблон, «трафарет» с шестью отверстиями (соответствующие местам соударения). Подложку накрывали трафаретом, после чего на неё распыляли смазку для импакторов (*Dow Corning 316 Silicone Release Spray*, изготовитель *Dow Corning Corp., Midland, MI*), образуя покрытие толщиной от 1 до 10 мкм. После распыления подложку выдерживали при постоянной температуре и влажности три дня для максимального удаления всех летучих компонентов силиконовой смазки. Затем взвешивали все подложки импактора и фильтр окончательной очистки, и устанавливали их в импактор. Для определения распределения частиц угольной пыли по размерам импактор использовали три раза. (Кроме того, три подложки и три фильтра завершающей очистки использовали для контроля (возможных ошибок измерений – через них воздух не прокачивали).

Для определения распределения значений среднего массового аэродинамического диаметра частиц пыли (MMAD) и стандартного геометрического отклонения (GSD) использовали линейную регрессионную линию, построенную на основе результатов измерений импактора. Её строили как график $Y=f(X)$, где по оси X откладывали логарифм размера частиц пыли, соответствующих пороговой эффективности ступени импактора; а по оси Y – обратную функцию накопительного нормального распределения (массы частиц пыли) (*inverse cumulative distribution function of the normal distribution or probit of cumulative mass percentages*). Использование прямой линии для регрессионного графика рекомендуется только тогда, когда данные достаточно хорошо соответствуют линейному распределению, так как в других случаях прямолинейная регрессия в чрезмерно большой степени учитывает значения Y в начале и в конце графика. Накопительные логарифмически-нормальные графики часто искривляются на концах, и это приводит к ошибкам при определении параметров регрессии [Hinds 1982]¹⁹. Чтобы учесть возможную ошибку по этой причине, мы использовали результаты измерений импактора лишь тогда, когда значение R^2 для регрессии было не ниже 0,95.

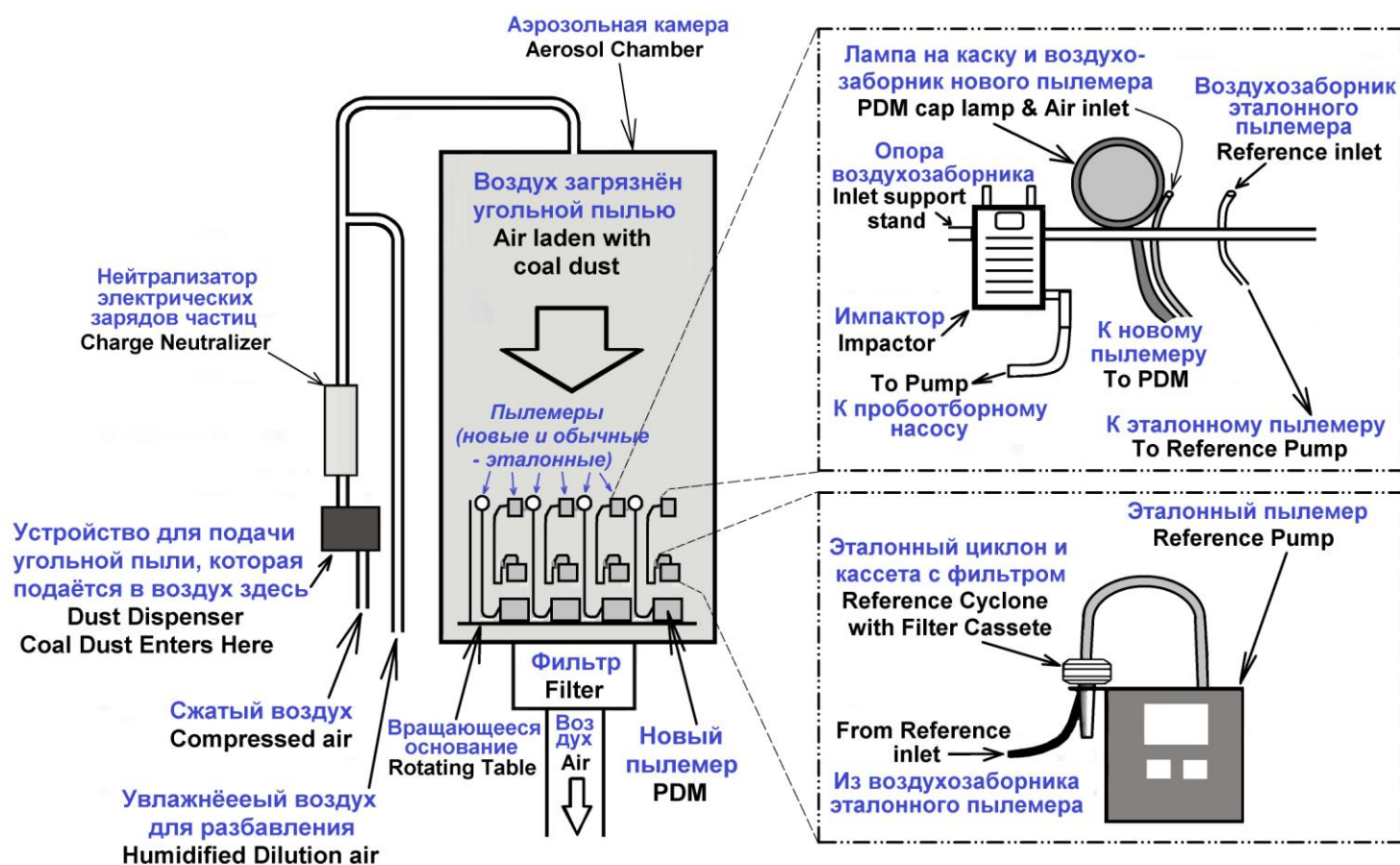
Точность гравиметрического анализа (взвешивания)

Для взвешивания (подложек и фильтров импактора) использовали микровесы Cahn (model C-31, изготовитель TEC, Boston, MA), а для взвешивания пыли, уловленной гравиметрическим пробоотборником BGI-4CP и фильтром CMDPSU - микровесы Mettler-Toledo (model UMT2, изготовитель Mettler-Toledo, Inc., Columbus, OH). Взвешивание проводили в Питтсбургской исследовательской лаборатории Института (PRL NIOSH) при температуре $22,78 \pm 3,9$ °C ($73 \pm 0,7$ °F) и относительной влажности $53 \pm 2\%$ RH. Для

взвешивания всех образцов, как до, так и после использования их для улавливания пыли, использовали контрольные, «фоновые» фильтры. Величина среднего загрязнения фоновых фильтров использовалась для коррекции результатов взвешивания уловленной пыли (у импакторов и персонального пробоотборника с циклонами BGI-4CP и CMDPSU) – во всех случаях. Но небольшие циклические отклонения в этих условиях, в течение (периода измерения длительностью) несколько минут не удалось полностью учесть с помощью контрольных фильтров по следующим причинам. Во-первых, взвешивание контрольных и пробоотборных фильтров проводилось не одновременно. Во-вторых, взвешивание фильтров до и после их использования для улавливания пыли не соответствовало по времени циклическому непостоянству условий окружающей среды (помещения). Поэтому была сделана оценка погрешности измерений массы пыли при её взвешивании.

Планирование проведения исследования

Так как размеры камеры *Marple* для создания контролируемой запылённой атмосферы были невелики, то (при проведении исследований) 25 пылемеров PDM обычно делили на две группы по 12 и 13 штук. Каждую из групп приборов проверяли по 3 раза; и при каждой из проверок использовали 15 пылемеров типа *BGI-4CP*. У всех пылемеров отверстия для всасывания запылённого воздуха (из камеры) равномерно располагали по кругу по отношению к центру камеры *Marple* (Фиг. 4).



Фиг. 4. Лабораторный стенд для испытания пылемеров (новых, PDM, и их сравнения с обычными, эталонными)

Figure 4.—Laboratory test chamber and arrangement of instruments.

15 (обычных) гравиметрических пылемеров делили произвольным образом на 4 группы по времени проведения измерений. Интервалы проведения измерений определяли с учётом того, сколько требуется времени для улавливания заранее установленной массы пыли (у группы пылемеров). При проведении первой серии замеров, интервал проведения измерений с помощью 6 пылемеров определяли так, чтобы учесть повышенное непостоянство эталонного измерительного прибора при концентрациях пыли, меньшей 0,5 мг/м³; а при второй, третьей и четвёртой серии замеров использовали по три пылемера. Массу пыли, уловленную (эталонными) пробоотборниками в каждой из (временных) групп, использовали для определения истинного значения запылённости в соответствующий интервал времени. Кроме того, при

проведении каждого замера, использовали по 3 контрольных фильтра. Эти фильтры использовали точно так же, как и пробоотборные – но воздух через них не прокачивали, и крышки кассет не открывали. При определении изменения массы пробоотборных фильтров, полученное значение корректировали с учётом результата взвешивания контрольных фильтров.

Длительность измерений выбирали так, чтобы пылеуловитель уловил порядка 0,2-4 мг пыли на фильтр (то есть – респирабельной пыли). Обычно для этого соответствующим образом программировали компьютер в новом пылемере, а эталонные пылемеры включали вручную в тот же самый момент времени. Но так как их было много, их включали не одновременно, а один за другим. Чтобы свести к минимуму различие во времени работы разных эталонных гравиметрических пылемеров, их выключали в такой же последовательности. Когда масса пыли, уловленная гравиметрическим фильтром, достигала требуемого значения, группу этих пылемеров выключали. Для определения требуемого интервала времени использовали новый пылемер *Model 1400a TEOM* с циклоном HD (при расходе воздуха 2,2 л/мин). Поэтому длительность измерений определялась количеством уловленной респирабельной пыли. В результате получилось 4 интервала времени проведения измерений с использованием эталонных гравиметрических пылемеров *BGI-4CP*. А для определения того, каковы результаты измерений нового пылемера в этот же интервал времени, использовали запись результатов измерений из файла этого прибора (для каждого из приборов). При трёхкратном проведении этих измерений получились практически повторяющиеся результаты, но в некоторых случаях масса уловленной пыли отличалась:

* **Первый замер, длительность 8 часов, интервал времени 1-4.** Концентрация пыли в камере была примерно 2 мг/м³. Эталонные гравиметрические пробоотборники выключали по мере накопления на них (на фильтрах) пыли 0,4; 0,9 и 2 мг. Для определения распределения пыли по размерам использовали три импактора. Результаты их измерений показали, что свойства угольной пыли схожи с результатами, полученными ранее для этой же пыли.

* **Второй замер, длительность 8 часов, интервал времени 5-8.** Концентрация респирабельной пыли в камере была 4 мг/м³. Эталонные гравиметрические пылемеры выключали по мере накопления на фильтрах респирабельной пыли массой: 1, 2, 3 и 4 мг.

* **Третий замер, длительность 8 часов, интервал времени 9-12.** Концентрация респирабельной пыли в камере была 2 мг/м³. Эталонные гравиметрические пылемеры выключали по мере накопления на фильтрах респирабельной пыли массой: 0,2; 0,7; 1,7 и 2,0 мг; эти измерения проводили три раза.

Испытание аккумулятора нового пылемера

При проведении предыдущего исследования было установлено, что ёмкости аккумулятора нового пылемера хватает на 12 часов работы. Но не изучалось, как сказывается разрядка аккумулятора на работе пылемера. Для определения влияния разрядки аккумулятора на скорость улавливания пыли и на расход воздуха использовали записи работы у 6 новых пылемеров, которые эксплуатировались до разрядки аккумуляторов. При проведении исследования в лаборатории использовали камеру *Marple* для создания запылённости 2 мг/м³. Эта концентрация непрерывно контролировалась с помощью нового пылемера *Model 1400a TEOM*, а новые пылемеры использовали до тех пор, пока аккумулятор не разрядится.

Проверка правильности значения коэффициента массы у нового пылемера PDM

При проведении этого исследования проводилась проверка коэффициента массы. Чтобы измерить массу пыли, у каждого их чувствительных элементов датчика запылённости ТЕ эмпирически определялось своё индивидуальное значение коэффициента массы.

Значение коэффициента массы

Коэффициент K_0 (*K zero*) определялся с помощью записи изменения частоты колебаний ТЕ при улавливании фильтром датчика известного количества пыли, и для оценки K_0 использовали следующее уравнение:

$$K_0 = m / \{ (1/f_f^2) - (1/f_i^2) \} \quad (2)$$

где

K_0 – коэффициент массы датчика концентрации пыли;

m – масса пыли, уловленной фильтром датчика ТЕ - в граммах;

f_f - частота колебаний датчика – после того, как пыль была уловлена фильтром, Гц;

f_i – исходная частота колебаний датчика – до того, как пыль была уловлена фильтром, Гц.

Для получения значения коэффициента K_0 для каждого из датчиков проводили по 5 замеров, и усредняли их результат. Значение K_0 определяли каждый раз, когда масса (грузиков, закреплённых на чувствительном элементе микровесов) изменялась. Затем полученное значение K_0 сравнивали с тем, которое было заложено в память пылемера на предприятии-изготовителе.

Определение коэффициента массы

Все новые пылемеры почистили, и установили в них новые фильтры. Отверстия для входа воздуха соединили с высокоэффективным противозольным фильтром (HEPA) чтобы избежать случайного загрязнения пылью. Во время проверки каждый из пылемеров был подключен к компьютеру/зарядному устройству, что позволяло отображать частоту колебаний чувствительного элемента ТЕ в реальном масштабе времени. Каждый из пылемеров работал не менее 1 часа (для разогрева) прежде чем были начаты измерения для определения коэффициента массы K_0 .

Для определения коэффициента массы на фильтры добавляли маленькие предварительно взвешенные алюминиевые «таблетки» с клеящим покрытием на одной стороне (для крепления к поверхности фильтра). Эти грузы взвешивали непосредственно перед проведением испытаний, взвешивание проводили в Питтсбургской исследовательской лаборатории.

После прогрева, пылемеры программировали с помощью программы (*WinPDM 5.12A expert software program*) так, чтобы внутренняя информация о частоте колебаний (не обработанная) считывалась и отображалась на дисплее, и записывалась – ежесекундно. Программа строила график этой не обработанной частоты колебаний в реальном масштабе времени. С помощью этого графика можно было определить, когда частота стабилизируется. Значение исходной (базовой) частоты f_i после её стабилизации записывали. После этого датчик запылённости вынимали из пылемера, и предварительно взвешенный алюминиевый груз крепили в центре фильтра чувствительного элемента ТЕ. Затем датчик ставили на его место в пылемер, и наблюдали за собственной частотой колебаний чувствительного элемента. Когда она стабилизировалась, записывали её значение (f_f после установки груза известной массы). Этот процесс повторяли 5 раз. Все грузики равномерно распределяли по фильтру, и приклеивали к нему. Масса грузов при каждом из замеров равнялась суммарной массе грузов, которые помещали на фильтр к моменту проведения этого замера. Затем вычисляли коэффициент массы с помощью уравнения 2, и вычисляли среднее значение K_0 для 5 измерений. Это среднее значение сравнивали с значением, заложенным в память прибора на предприятии-изготовителе.

Анализ

Для определения точности и чувствительности (*accuracy and precision*) использовали результаты парных измерений – с помощью новых пылемеров, и с помощью усреднённых значений, полученных с помощью эталонных гравиметрических пылемеров. Для определения точности, погрешности и чувствительности использовали метод, описанный Kennedy et al. [1995]²⁰. Точность считалась способностью определить правильное значение концентрации; погрешность считалась не корректируемым относительным отклонением между средним значением (результатов измерений) и истинной концентрацией; и чувствительность – относительная изменчивость результатов повторных измерений по отношению к среднему значению этих же измерений. При проведении этих испытаний, отношение массы, измеренной новым пылемером, к массе, измеренной гравиметрически, определяли путём деления результатов конкретного измерения PDM на среднее значение трёх гравиметрических измерений за соответствующий временной интервал. Затем эти отношения масс усредняли для каждой из групп исходных данных. для нового пылемера PDM, и для результатов гравиметрических измерений вычисляли относительное стандартное отклонение RSD. Для уменьшения влияния погрешности гравиметрических измерений, значение RSD для всех гравиметрических измерений (вместе взятых) вычли из каждого из значений RSD, использовавшегося для сравнения точности измерений (выполненных с помощью нового пылемера PDM, и гравиметрически). Значение RSD после коррекции определялось по формуле:

$$RSD_x = \sqrt{(RSD_{x/t})^2 - (RSD_{Ti})^2} \quad (3)$$

где

sqrt – квадратный корень;

RSD_{x/t} - относительное стандартное отклонение отношения масс;

а экспериментальное суммарное RSD гравиметрических замеров (**RSD_{Ti}**) вычисляли по формуле:

$$RSD_{Ti} = 0,5 * \sqrt{(\sum (RSD_{gravimetric})^2 / n)} \quad (4)$$

где **sqrt** – квадратный корень;

Затем вычисляли погрешность, используя среднюю концентрацию минус 1. Чувствительность (*accuracy*) вычисляли по методу Kennedy et al. [1995]²¹. Для определения доверительных интервалов использовали метод, описанный Bartley [2001]²² – с использованием не-центрального t-распределения Стьюдента (*noncentral Student's t-distribution*). Точность измерений нового пылемера анализировали для каждого из замеров, используя для этого значения RSD нового пылемера и эталонных гравиметрических измерителей при накоплении на фильтрах от 0,2 до 4,3 мг респиральной пыли. Чтобы определить «общую» точность нового пылемера на основании анализа лабораторных испытаний, проводившихся перед испытаниями в шахтах, значения RSD определяли с помощью однофакторного анализа изменчивости (*one-way analysis of variance ANOVA*). Для определения относительного стандартного отклонения в пределах одного испытания (*intratest RSD*) использовали квадратный корень из среднеквадратических ошибок (*square root of the mean square error RMSE*). При проведении этого анализа зависимой переменной была концентрация пыли, измеренная в миллиграммах на кубометр, а независимой (или групповой) переменной была лабораторная проверка. Было проведено 6 проверок по 12-13 новых пылемеров за одну проверку. При проведении каждой из проверок, концентрацию пыли измеряли в течение 4 временных интервалов. Для каждого нового пылемера, концентрацию пыли усредняли за временной интервал, относящийся к данной проверке. Чтобы проведение вычислений соответствовало тому, как они проводятся для обработки результатов измерений в шахтах, результаты измерений PDM логарифмически преобразовывали (используя натуральные логарифмы) перед проведением анализа.

Подробные испытания в шахтах

При проведении этой части исследования, новые пылемеры проверялись в подземных условиях при их использовании шахтёрами, для определения их механической работоспособности, удобства и эргономических свойств при длительном применении. Определялась точность измерений новых пылемеров и эталонных гравиметрических измерителей.

Критерии для выбора шахт для проведения испытаний

Проведение этих испытаний требовало достаточно хорошего уровня взаимодействия с работниками шахты для того, чтобы провести обучение персонала, выделить необходимое место для работы, и проводить регулярное периодическое техобслуживание новых пылемеров без участия представителей Института. Необходимость такого хорошего взаимодействия не позволяла выбирать для испытаний шахты случайным образом. Но (мы) выбрали шахты так, чтобы приборы испытывались в условиях добычи разных видов угля, при использовании разных горных машин, шахты располагались в разных частях страны, толщина пластов угля была различна, и численность сотрудников шахты – неодинакова. (Мы) выбрали шахты так, что они находились в каждом из 10 округов MSHA (для шахт, где добывается каменный уголь). В таблице 1 приводится описание каждой из шахт. В пределах каждой из шахт, (мы) выбрали рабочих, использовавших разные горные машины, и работавшие в разных местах – так, чтобы измерения были сделаны в разных условиях, характерных для условий добычи угля в шахте.

Таблица 1. Описание шахт, в которых проводилось исследование, и положение измерителя запылённости воздуха рабочей зоны

Округ MSHA	Высота шахты, м (дюймов)	Технология добычи угля*	Дополнительные свойства	Положение стационарного измерительного прибора <i>Lippmann sample</i>
2	1,651 (65)	CM	<i>Exhaust vent tube, integral miner bolter</i>	Слева сзади от комбайна.
3	1,778 (70)	CM	<i>Exhaust vent tube, integral miner bolter.....</i>	<i>On miner near left bolter.</i>
4	1,651 (65)	LW	Использовали удалённый источник питания PDM	<i>Shield 30.</i>
5	1,219 (48)	CM	<i>Scrubber, bridge face haulage</i>	<i>Immediate miner return</i>
6	1,422 (56)	CM	Маленькая шахта	<i>Bolter</i>
7	1,27 (50)	CM	<i>Pillar section – retreat ventilation to gob</i>	<i>Behind miner toward gob side.</i>
8	1,168 (46)	CM	<i>Super section single split vent, тонкий пласт</i>	<i>Immediate miner return.</i>
9	3,048+ (120+)	LW	Толстый угольный пласт	<i>Shield 20.</i>
10	1,168 (46)	CM	Тонкий пласт, <i>super section</i>	<i>Immediate miner return.</i>
11	1,829 (72)	CM	Дизельный погрузчик? (<i>Diesel face haulage</i>)	<i>Twin boom bolter.</i>

*CM – *Continuous mining* – камерно-столбовая добыча с использованием короткозабойных очистных комбайнов;

*LW – *Longwall mining* – разработка (угля) длинными забоями.

Порядок проведения измерений

На каждом из мест, где проводилась подземная проверка нового пылемера, (специалисты) Института проводили три дня, чтобы показать местным сотрудникам, как использовать новый пылемер, и как проводить его техобслуживание. Замеры проводились у всех горнорабочих, работавших в забое, в течение всей смены. Для этого они входили в и выходили из забоя (*travel to and from the working section*). Дополнительно определялась точность (*precision*) трёхкратных замеров. После этого в 6 из 10 шахт новые пылемеры оставили местным сотрудникам, и они использовали их в отсутствие специалистов Института. В конце весны 2005г, после завершения подробного исследования нового пылемера в десятой шахте, 4 горных компании провели расширенное испытание новых пылемеров в своих шахтах для того, чтобы лучше определить (автономные) эксплуатационные свойства устройства.

В каждой из шахт, в начале смены, специалисты Института проводили 45-минутное занятие. Они показывали короткий учебный видеоролик, что позволяло давать сотрудникам шахт информацию совершенно одинаково. Каждому из шахтёров, использовавшему новый пылемер, давали карманный справочник по пылемеру (*memory jogger card*) для напоминания ему (или ей) о вопросах, рассмотренных в учебном видеоролике. Участок шахты, где шахтёры использовали новый пылемер, выбирался сотрудниками администрации и представителями рабочих (*hourly employee representatives*). Помимо обучения горнорабочих забоя, руководителей, представителей трудовых коллективов и специалистов по безопасности и охране труда, специалисты Института проводили обучение тех сотрудников шахт, которые впоследствии (самостоятельно) проводили периодическое техобслуживание новых пылемеров.

В результате проведения исследований была получена информация о концентрации пыли в течение всей смены, код MSHA специальности рабочего (использовавшего пылемер), и сведения обо всех проблемах, возникавших при проведении измерений. Сотрудники горнодобывающих компаний программировали пылемеры так, чтобы те автоматически начинали проводить измерения с начала смены, и продолжали их в течение всей смены. Использовалось от 7 до 14 новых пылемеров в зависимости от численности горнорабочих в забое, использовалось от 7 до 14 новых пылемеров. Каждый день шахтёры брали свои пылемеры (точно так же, как они брали лампы на каски), и в конце смены они возвращали их тому, кто выдавал. После получения пылемера от шахтёров, сотрудник горной компании переписывал результаты измерений из памяти пылемера, очищал воздухопровод (по которому всасывался воздух для измерения запылённости), очищал циклон, заменял фильтр на чувствительном элементе датчика запылённости, и задавал программу работы на следующую смену. Считали, что результаты измерений достоверны, если пылемер работал всю смену – без отказов механических частей, электроники и без ошибок персонала. Эти результаты могли позднее считаться недостоверными, если проверка показывала, что расход прокачиваемого воздуха был некорректный, или при выявлении других ошибок. Число замеров, во время которых не было отказов оборудования, поделенное на общее число замеров, было показателем успешности проведения измерений (при проведении этого вида испытаний). При дальнейшем анализе записи результатов измерений они могли оцениваться как недостоверные по каким-то причинам, но это не влияло на общий показатель успешности полносменных замеров (с точки зрения работоспособности оборудования). Считали, что если расход воздуха у нового пылемера был $2,2 \text{ л/мин} \pm 5\%$, то он в пределах допустимого. А если датчик расхода воздуха нового пылемера регистрировал отклонение $\pm 0,2 \text{ л/мин}$ от калибровочного значения в течение 60 секунд, на индикаторе прибора появлялось сообщение об ошибке, и делалась запись в файле с результатами измерений (для последующего определения серьёзности сбоя).

При проведении измерений, первые три дня сотрудники Института делали замеры (запылённости) воздуха рабочей зоны, а также находился (на рабочих местах шахтёров) для помощи при использовании новых пылемеров, сопровождали шахтёров и отвечали на их вопросы. На первых шести шахтах, сотрудники Института оставили все новые пылемеры местным сотрудникам. Те же шахтёры с тех же рабочих мест продолжали использовать пылемеры и на следующей неделе. Если какой-то шахтёр не выходил на работу, новый пылемер использовал вместо него другой рабочий, замещавший отсутствовавшего. Аналогично, если вся бригада, работавшая на участке, заменялась вечерней сменой, то пылемеры оставались с этой сменой для продолжения их использования. Если в наличии оказывались дополнительные приборы, то их давали использовать тем шахтёрам, которые работали вдали от забоя (это иногда случалось). На следующей неделе специалисты института возвращались в шахту и сопровождали шахтёров во время работы. Они наблюдали за выполнением работы и применением пылемеров, и опрашивали шахтёров. Затем (мы) собирали пылемеры, и сделанные с их помощью замеры. Это позволяло получить от каждого пылемера от 8 до 11 полносменных записей от каждого из работавших с прибором в забое. Из-за того, что на некоторых шахтах проводили замеры и в выходные, и из-за измерений в режимах работы, число дней замеров оказалось не одинаковым.

Замеры запылённости воздуха рабочей зоны

В каждой из шахт в течение трёх дней проводились измерения запылённости воздуха рабочей зоны с целью определить точность измерений нового пылемера, (работоспособность) циклона-сепаратора крупной пыли DO, и определить распределение пыли по размерам с помощью импактора. Для проведения измерений использовали стационарный прибор Липмана (*stationary Lippmann-type sampling apparatus*) [Blachman and Lippmann 1974]²³; [Volkwein and Thimons 2001]²⁴. Выполняли трёхкратные замеры с помощью нового пылемера, персональных импакторов *Marple*, и обычных гравиметрических персональных пробоотборников *CMDPSU* при расходе воздуха 2 л/мин и 1,7 л/мин. Использование стационарного прибора Липмана сводило к минимуму непостоянство результатов, связанное с местом проведения замеров в шахте. Взвешивание и калибровка при выполнении этого этапа испытаний совпадали с процедурами при лабораторном этапе испытаний. Трёхдневные измерения в 10 шахтах дали суммарно 30 (трёхкратных) замеров, результаты которых использовали для определения точности новых пылемеров.

Техобслуживание и записи об использовании

Во время проведения исследования, проводилась запись о случаях применения каждого из 25 использовавшихся пылемеров PDM. Для каждого устройства сохранялась хронологическая запись, где отмечалось – сколько часов прибор использовался с момента получения до момента завершения исследования. Сюда включали все измерения – как в лабораторных, так и в производственных условиях, без учёта характера применения, и без учёта наблюдения за работой. Для оценки общего (суммарного) применения новых пылемеров, учитывали лишь общее время работы приборов, а отличие в условиях применения не учитывали.

У каждого из пылемеров была своя запись о проведённых ремонтах, и туда частично включали информацию о виде неисправности, и виде ремонта, выполненного для устранения этой неисправности. В отношении записей о выполненном ремонте, указывались признаки, позволявшие различать (разные виды) ремонта, выполненного предприятием-изготовителем. Учитывали два типа ремонта – серьёзный и незначительный. К незначительному относили такие доработки программного обеспечения или механической части прибора, которые были незначительны, и которые вряд ли потребуют повторения после их полноценного выполнения. Примерами такого ремонта можно считать улучшение заводского программного обеспечения для улучшения работы пылемера, устранение заводских дефектов, замеру неисправных клавиш на лицевой стороне и замеру экрана дисплея. А серьёзными неисправностями считали такие, которые требовались для того, чтобы весь прибор мог нормально работать, и выдавать достоверный результат измерений. Считали, что частота выполнения серьёзного ремонта более точно отражает общую конечную надёжность пылемера после улучшения его конструкции.

Для определения того, успешно ли новый пылемер выполнил замер, регистрировали и другую информацию. Если пылемер завершал работу, и делал достоверные замеры во время этой смены, то считали, что он успешно выполнял замер (в течение смены). А если он не смог выполнить замер в течение всей смены, или если файлы с результатами измерений были повреждены, то считали, что замер выполнен неудачно. При наличии записи о том, что замер выполнен неудачно, какую-то классификацию видов отказов не проводили. Специалисты выявляли причину отказов нового пылемера, и устраняли их – сразу после обнаружения. Во многих случаях для обеспечения нормальной работы требовалось (лишь) выполнить небольшую регулировку. Гораздо реже требовалось отправлять прибор для (серьёзного) ремонта на предприятие-изготовитель.

Анализ точности измерений в производственных условиях

Для определения точности измерений нового пылемера, и циклона DO (при расходе воздуха 2,0 и 1,7 л/мин), с помощью однофакторного анализа изменчивости ANOVA вычисляли относительное стандартное отклонение RSD. Чтобы определить изменчивость (средних значений трёхкратных измерений) в течение одного дня, определяли относительное стандартное отклонение RSD с помощью анализа изменчивости ANOVA. Так как распределения значений концентрации пыли не были нормальными, а имели положительный «скос» (*were positively skewed*) у каждого из измерительных приборов, перед проведением анализа результаты измерений были логарифмически преобразованы (использовали натуральные логарифмы). При проведении анализа зависимой переменной была измеренная концентрация пыли (мг/м³), а независимой (или групповой) переменной была дата проведения измерений в шахте. Имелось 30 результатов уникальных трёхкратных замеров, полученных с помощью каждого из измерительных устройств.

Результаты

Лабораторная проверка точности

Точностью нового пылемера считали его способность правильно определять концентрацию (респираторной) пыли в окружающей атмосфере. В документе Volkwein et al. [2004]²⁵ описано исследование того, соответствуют ли результаты измерений прототипа нового пылемера критериям Института к точности. Ограниченное испытание новых пылемеров (предпродажной версии) в лаборатории до начала испытаний в шахтах проводилось для проверки их эксплуатационных свойств, и было схоже с упомянутой проверкой прототипа нового пылемера.

Проверка точности перед применением пылемеров в шахтах

В таблице 2 приводятся результаты испытаний, проводившихся для определения точности измерений запылённости с помощью прибора PDM 3600 – средние результаты измерений концентрации пыли с помощью измерителя BGI-4CP (обычного) для каждого интервала времени; соответствующий результат, полученный с помощью нового пылемера, и значения относительного стандартного отклонения для каждого из приборов. При проведении первой группы измерений, значения относительного стандартного отклонения у результатов измерений гравиметрическими (стандартными) пылемерами составили 0,041, а при проведении второй группы измерений – 0,039. У нового пылемера для первой и второй групп измерений соответствующие значения составляли 0,057 и 0,043. Для всех результатов вместе, относительное стандартное отклонение RSD было 0,051 (с 95% доверительными пределами 0,048 и 0,057). Это значение будет использоваться в дальнейшем при рассмотрении точности измерений в производственных условиях.

Таблица 2. Результаты измерений, выполненных (в лаборатории) перед началом применения нового пылемера в шахтах. Результаты измерений нового пылемера PDM, и эталонный результат измерений обычным гравиметрическим пылемером. В верхней таблице приводятся результаты для первой группы пылемеров (12 шт из 25), в нижней – для второй (13 шт из 25).

Интервал времени	Результат гравиметрических измерений (среднее значение), мг	RSD	Результаты измерений нового пылемера PDM №													RSD
			110	112	113	115	119	126	127	128	130	131	132	133	135	
			мг	мг	мг	мг	мг	мг	мг	мг	мг	мг	мг	мг	мг	
1	0,426	0,048	0,377	0,406	0,384	(1)	0,409	0,388	0,359	0,431	0,413	0,393	0,414	0,357	0,381	0,058
2	0,968	0,047	0,901	0,956	0,903	(1)	0,958	0,903	0,939	0,992	0,952	0,897	0,967	0,843	0,881	0,046
3	1,506	0,033	1,384	1,481	1,397	(1)	1,483	1,397	1,462	1,515	1,453	1,363	1,481	1,289	1,354	0,048
4	2,184	0,023	1,931	2,054	1,942	(1)	2,053	1,933	2,036	2,108	2,020	1,887	2,064	1,792	1,884	0,048
5	1,132	0,033	1,050	1,066	0,994	0,955	1,052	1,047	1,013	1,124	1,033	1,009	(1)	0,935	1,061	0,050
6	2,160	0,049	2,104	2,163	1,991	1,929	2,098	2,115	2,032	2,254	2,097	2,000	(1)	1,839	2,115	0,054
7	3,244	0,054	3,075	3,161	2,910	2,833	3,068	3,110	2,976	3,298	3,076	2,923	(1)	2,658	3,087	0,055
8	4,308	0,036	3,980	4,090	3,757	3,675	3,970	4,027	3,843	4,271	3,989	3,795	(1)	3,425	3,975	0,056
9	0,193	0,082	0,196	0,202	0,201	0,202	0,212	0,196	0,204	0,205	0,222	0,197	0,203	0,165	0,214	0,066
10	0,747	0,021	0,732	0,732	0,733	0,727	0,774	0,732	0,741	0,757	0,800	0,701	0,759	0,596	0,797	0,069
11	1,796	0,033	1,688	1,700	1,702	1,689	1,792	1,697	1,720	1,776	1,837	1,637	1,788	1,396	1,833	0,066
12	2,144	0,033	1,967	1,984	1,975	1,959	2,076	1,968	1,993	2,072	2,139	1,909	2,074	1,633	2,124	0,064
Среднее значение RSD для гравиметрических пылемеров = 0,041, среднее значение RSD для новых пылемеров PDM = 0,057.																

Интервал времени	Результат гравиметрических измерений (среднее значение), мг	RSD	Результаты измерений нового пылемера PDM №													RSD	
			102	105	108	109	111	114	116	120	122	123	124	125	115		132
			мг	мг	мг	мг	мг	мг	мг	мг	мг	мг	мг	мг	мг		мг
1	0,424	0,069	0,410	0,377	0,376	0,432	0,451	0,395	0,427	0,391	0,430	0,426	0,372	0,411	0,400	0,061	
2	1,003	0,025	0,914	0,854	0,860	0,967	0,989	0,887	0,971	0,889	0,960	0,960	0,840	0,925	0,901	0,054	
3	1,572	0,034	1,454	1,354	1,376	1,508	1,571	1,406	1,544	1,415	1,521	1,515	1,331	1,481	1,433	0,052	
4	2,115	0,034	1,990	1,865	1,917	2,055	2,149	1,927	2,125	1,949	2,076	2,082	1,836	2,037	1,973	0,049	
5	1,111	0,044	1,055	1,008	0,993	1,009	1,089	1,011	1,095	1,059	1,028	1,108	1,048	1,076	1,066	0,035	
6	2,169	0,002	2,024	1,928	1,918	1,930	2,097	1,957	2,108	2,035	1,974	2,131	2,016	2,070	2,055	0,036	
7	3,224	0,042	2,999	2,890	2,874	2,864	3,130	2,914	3,124	3,028	2,961	3,159	2,978	3,067	3,058	0,034	
8	4,213	0,030	3,846	3,709	3,689	3,683	4,002	3,744	4,012	3,891	3,814	4,046	3,809	3,927	3,916	0,032	
9	0,185	0,076	0,203	0,202	0,192	0,199	0,204	0,191	0,205	0,194	0,198	0,203	0,181	0,218	0,045		
10	0,724	0,025	0,730	0,721	0,692	0,717	0,736	0,703	0,758	0,710	0,724	0,750	0,676	0,768	0,037		
11	1,814	0,040	1,742	1,722	1,646	1,702	1,777	1,673	1,798	1,685	1,722	1,772	1,613	1,839	0,038		
12	2,035	0,051	2,005	1,985	1,893	1,969	2,041	1,936	2,075	1,952	1,987	2,043	1,867	2,117	0,037		
Среднее значение RSD для гравиметрических пылемеров = 0,039, среднее значение RSD для новых пылемеров PDM = 0,043.																	

(1) – этот пылемер при проведении этих замеров попал во вторую группу приборов (см. нижнюю часть таблицы).

Усреднённый результат измерения распределения по размерам частиц пыли в пылевой камере дал результат: средний массовый аэродинамический диаметр частиц пыли MMAD = 3,91 мкм (RSD=0,007), и стандартное геометрическое отклонение 2,58. Этот результат схож с распределением по размерам Питтсбургской угольной пыли, которая использовалась при определении точности прототипа нового пылемера [Volkwein et al. 2004]²⁶.

Проверка точности после применения пылемеров в шахтах

Результаты измерений точности после применения приборов в шахтах показаны в таблице 3. Эти результаты получены путём усреднения трёхкратного измерения с помощью (стандартного) гравиметрического пылемера BGI-4CP для каждого из временных интервалов, проведения соответствующих им измерений с помощью нового пылемера PDM, и определения относительного стандартного отклонения RSD у обоих приборов. В первой группе испытаний у гравиметрического пылемера среднее (общее для всех замеров) значение RSD было 0,039, а во второй группе замеров – 0,049. В таблице приведены значения RSD для каждого из новых пылемеров PDM и каждого из интервалов времени. У нового пылемера в первой группе замеров среднее (общее для всех замеров) значение RSD было 0,056; а во второй – 0,051. В среднем, значение среднего массового аэродинамического диаметра частиц пыли в испытательной камере было 4,01 мкм (RSD=0,079), и стандартное геометрическое отклонение GSD = 2,53.

Таблица 3. Результаты измерений точности новых пылемеров PDM после их использования в шахтах, и соответствующие результаты измерений стандартного гравиметрического пылемера.

Интервал времени	Результат гравиметрических измерений (среднее значение), мг	RSD	Результаты измерений (мг) нового пылемера PDM №													RSD
			102	108	112	113	114	115	119	120	123	124	125	127	128	
1	0.425	0.026	(1)	0.373	0.445	0.397	0.359	0.386	(1)	0.410	0.404	0.405	0.429	0.418	0.388	0.058
2	0.960	0.030	(1)	0.817	0.953	0.861	0.788	0.832	(1)	0.895	0.880	0.885	0.932	0.892	0.850	0.053
3	1.475	0.065	(1)	1.281	1.463	1.344	1.220	1.278	(1)	1.368	1.369	1.365	1.438	1.373	1.328	0.048
4	1.950	0.029	(1)	1.717	1.955	1.794	1.629	1.720	(1)	1.827	1.833	1.833	1.923	1.822	1.777	0.046
5	1.012	0.049		0.885	0.875	0.995	0.890	0.824	0.865	0.931	0.982	0.946	0.931	1.010	0.947	0.064
6	1.931	0.038		1.759	1.741	1.972	1.764	1.638	1.740	1.859	1.947	1.870	1.843	1.995	1.891	0.061
7	2.899	0.033		2.639	2.608	2.958	2.656	2.460	2.627	2.789	2.919	2.809	2.763	2.981	2.827	0.060
8	3.906	0.038		3.576	3.512	3.997	3.601	3.329	3.566	3.757	3.938	3.801	3.741	4.011	3.821	0.058
9	0.209	0.048		0.185	0.173	0.202	0.189	0.162	0.179	0.193	0.197	0.191	0.190	0.184	0.193	0.061
10	0.709	0.047		0.669	0.621	0.692	0.652	0.585	0.647	0.673	0.701	0.707	0.689	0.661	0.675	0.054
11	1.738	0.042		1.601	1.506	1.672	1.568	1.420	1.560	1.620	1.667	1.714	1.647	1.580	1.628	0.052
12	2.114	0.028		1.874	1.772	1.963	1.848	1.664	1.836	1.907	1.964	2.000	1.940	1.856	1.913	0.051

Среднее значение RSD для гравиметрических пылемеров = 0,039,
среднее значение RSD для новых пылемеров PDM = 0,056.

Интервал времени	Результат гравиметрических измерений (среднее значение), мг	RSD	Результаты измерений (мг) нового пылемера PDM №														RSD
			105	109	110	111	116	122	126	130	131	132	133	135	102	119	
1	0.395	0.044	0.361	0.355	0.353	0.323	0.378	0.385	0.371	0.367	0.329	0.342	0.336	0.353	0.363	0.378	0.053
2	0.962	0.062	0.831	0.800	0.786	0.728	0.843	0.869	0.823	0.817	0.758	0.771	0.752	0.786	0.830	0.864	0.053
3	1.425	0.007	1.283	1.228	1.205	1.128	1.313	1.340	1.276	1.272	1.173	1.188	1.169	1.226	1.275	1.328	0.052
4	2.096	0.040	1.854	1.758	1.734	1.617	1.890	1.936	1.838	1.829	1.690	1.719	1.671	1.766	1.837	1.913	0.054
5	1.031	0.029	0.912	0.850	0.844	0.795	0.940	0.931	0.900	0.895	0.889	0.852	0.854	0.888			0.047
6	2.061	0.036	1.856	1.692	1.696	1.590	1.900	1.868	1.804	1.803	1.785	1.716	1.699	1.771			0.051
7	2.909	0.023	2.788	2.519	2.521	2.363	2.825	2.783	2.696	2.696	2.652	2.568	2.523	2.625			0.052
8	3.901	0.093	3.712	3.360	3.371	3.173	3.786	3.721	3.595	3.602	3.573	3.428	3.372	3.502			0.052
9	0.183	0.078	0.175	0.174	0.170	0.163	0.169	0.180	0.189	0.185	0.187	0.180	0.169	0.188			0.049
10	0.722	0.125	0.637	0.583	0.580	0.578	0.613	0.654	0.667	0.637	0.633	0.608	0.595	0.638			0.049
11	1.772	0.020	1.554	1.405	1.385	1.389	1.482	1.582	1.598	1.528	1.524	1.458	1.425	1.539			0.051
12	2.146	0.027	1.853	1.666	1.650	1.652	1.762	1.890	1.907	1.822	1.813	1.740	1.693	1.839			0.052

Среднее значение RSD для гравиметрических пылемеров = 0,049,
среднее значение RSD для новых пылемеров PDM = 0,051.

(1) – этот пылемер при проведении этих замеров попал во вторую группу приборов (см. нижнюю часть таблицы).

Точность

Результаты испытаний новых пылемеров перед их применением в шахтах подтвердили предположение о том, что изменения в конструкции нового пылемера 3600 PDM (по отношению к прототипу PDM-1) не повлияли на точность измерений приборов. В таблице 4 показаны результаты вычислений точности (*accuracy*), погрешности, чувствительности (*precision*) и значений верхнего 95% доверительного предела (*UCLs*). Результаты оценки погрешности показывают, что результат измерений у нового пылемера систематично ниже, чем у стандартного гравиметрического пылемера. Это систематическое отклонение (перед испытаниями – в шахтах) было 5,2%. Несмотря на эту систематическую погрешность, довольно высокая точность измерений у нового пылемера позволяет определить концентрацию пыли с погрешностью, соответствующему критерию $\pm 25\%$ с доверительной вероятностью 95%. Если прибор не соответствовал требованиям к значению верхнего доверительного предела (95% UCL), но при этом его результаты измерений не выходили за пределы 5% доверительного предела (*but to not exceed a 5% CL*), то считали, что полученный результат измерения точности – неубедителен. Нужно отметить, что при проведении лабораторных испытаний приборов после их применения в шахтах, все пылемеры, у которых погрешность (*bias*) была больше, чем -0,13, были приборами, которые не соответствовали требованиям к верхнему 95% доверительному пределу. Причины этого рассмотрены ниже.

Таблица 4. Результаты вычислений точности измерений новых пылемеров по результатам лабораторных испытаний, до и после проверки в шахтах

№ пылемера PDM	Испытания в лаборатории до испытаний в шахтах				Испытания в лаборатории после испытаний в шахтах			
	Погрешность	Точность	Чувствительность	Верхний 95% доверительный предел	Погрешность	Точность	Чувствительность	Верхний 95% доверительный предел
102	-0.04	0.05	12	18	-0.10	0.02	12	14
105	-0.08	0.07	18	26	-0.10	0.03	13	16
108	-0.09	0.05	16	21	-0.13	0.02	15	17
109	-0.05	0.06	14	20	-0.16	0.05	22	27
110	-0.06	0.03	11	15	-0.16	0.05	23	27
111	0.00	0.04	8	11	-0.20	0.04	25	28
112	-0.03	0.03	7	10	-0.01	0.03	5	8
113	-0.07	0.05	14	19	-0.09	0.01	10	11
114	-0.08	0.04	13	18	-0.18	0.02	20	22
115	-0.08	0.06	17	22	-0.11	0.02	14	15
116	0.00	0.04	7	11	-0.10	0.05	16	21
119	-0.02	0.05	10	15	-0.07	0.02	9	11
120	-0.06	0.04	12	16	-0.04	0.03	8	11
122	-0.04	0.05	11	16	-0.07	0.02	11	13
123	-0.01	0.03	7	10	-0.05	0.02	8	10
124	-0.10	0.04	16	20	-0.06	0.01	7	7
125	-0.01	0.07	14	21	-0.03	0.06	12	18
126	-0.06	0.03	10	14	-0.09	0.04	15	20
127	-0.06	0.05	14	20	-0.05	0.02	8	10
128	0.01	0.02	4	6	-0.08	0.02	11	12
130	-0.01	0.07	13	20	-0.11	0.04	17	21
131	-0.09	0.04	14	18	-0.13	0.07	22	28
132	-0.02	0.03	7	10	-0.15	0.05	22	26
133	-0.18	0.04	22	25	-0.17	0.04	22	25
135	-0.04	0.07	16	24	-0.12	0.05	19	24

Хотя результаты испытаний показали, что у некоторых из приборов после испытаний в шахтах точность измерений недостаточно высокая (неубедительный результат - *inconclusive*), но средние значения точности (*accuracy* – до и после испытаний в шахтах) были статистически одинаковы. Результаты независимых испытаний с помощью t-test показали, что среднее значение точности до испытаний в шахтах 14,67 (95% доверительные пределы = 12,21 и 17,08) ($t\text{-value} (df = 48) = -1,63, p\text{-value} = 0,11$). Нулевая гипотеза (о равенстве точности до и после испытаний в шахтах) не может быть отвергнута.

Один из новых пылемеров не смог показать соответствие требованиям к точности (95% верхнему доверительному пределу) при проведении испытаний до проверки в шахтах. Прибор был отправлен на предприятие-изготовитель для проверки и регулировки. Мы не смогли проверить качество работ по его настройке, сделанной изготовителем. Поэтому этот образец пылемера не использовался при определении точности измерений новых пылемеров в шахтах. Но измерения точности у этого прибора после его применения под землёй показали, что она соответствует требованиям.

Калибровка для установления коэффициента K0

Мы попытались определить, почему у некоторых из приборов после испытаний в шахтах точность не соответствовала требованиям (95% верхний доверительный предел). В таблице 5 показаны результаты лабораторных измерений значений коэффициента K0, используемого прибором для вычисления массы на основании измеренной частоты колебаний чувствительного элемента TE. Значения относительного стандартного отклонения RSD при неоднократных измерениях K0 у двух приборов были 0,0038 и 0,0027.

Таблица 5. Сравнение значений коэффициента K0 у пылемеров PDM, заложенного в программное обеспечение, и измеренное при проведении испытаний.

Номер пылемера PDM	Испытания до проверки в шахтах		“” после проверки в шахтах		Измеренное значение K0	Заложенное в программу значение K0	Отличие значений K0, %
	Точность, %	Верхний 95% доверительный предел	Точность, %	Верхний 95% доверительный предел			
119	10	15	9	10	15368	15427	-0.4
127	14	20	8	9	15138	15552	-2.7
112	7	10	5	8	15827	16028	-1.3
112	Rep	Rep	Rep	Rep	15719	16028	-2.0
112	Rep	Rep	Rep	Rep	15724	16028	-1.9
110	11	15	23	27	15166	15284	1.14
131	14	18	22	28	15138	14827	2.1
133	22	25	23	26	15107	14361	4.9
132	7	10	22	26	14534	13846	4.7
132	Rep	Rep	Rep	Rep	14537	13846	4.8
132	Rep	Rep	Rep	Rep	14466	13846	4.3

Rep – проводились повторные измерения коэффициента K0.

Мы сравнили значения коэффициента K0 у приборов, которые показали наибольшую и наименьшую точности (после испытаний в шахтах). У трёх пылемеров (с наибольшей, или с наименьшей точностью – согласно верхнему доверительному пределу UCL), значение коэффициента K0, заложенное в программу, (отличалось) от измеренного, отличие в пределах 2,7%. Но у четырёх приборов, которые не соответствовали к требованиям к точности при испытаниях после проверки в шахтах, отличие достигало 4,9%. Изучение файлов с записью результатов измерений и соответствующих параметров показало, что у некоторых из приборов значение K0 было изменено на предприятии-изготовителе в интервале между проверкой этих приборов до применения в шахтах, и после применения в шахтах (когда пылемеры ремонтировали). Не все приборы потребовали такой повторной калибровки. Но все пылемеры, у которых проводился ремонт чувствительного элемента датчика (модуль TE, например – ремонт датчика температуры), могли требовать повторной калибровки для уточнения значения K0. Так как этот коэффициент прямо пропорционален массе, проведение такой повторной калибровки могло стать причиной того, что проверка приборов после применения в шахтах не показала соответствия требованиям к точности (верхний 95% доверительный предел UCL). Погрешность при калибровке для определения коэффициента могла стать причиной наблюдавшейся недостаточной точности.

Порог чувствительности и предел количественного определения

Для традиционного определения предела количественного определения (*limit of quantification, LOQ*) необходимо определить стандартное отклонение (Sw) при 9 последовательных взвешиваниях чистого фильтра [Marple and Rubow 1983]²⁷. Мы получили, что у обоих весов значения стандартных отклонений Sw совпали (= 1,4 мкг). И (мы) получили итоговое значение предела количественного определения LOQ = 14 мкг при однократном взвешивании. Однако выполнение процедур, направленных на обеспечение контроля качества, и при использовании контрольных фильтров только в помещении для взвешивания показала, что значение *полного* стандартного отклонения St из-за стандартных отклонений Sw и непостоянства условий в помещении для взвешивания (во время проведения этого исследования) стало равно 4,1 мкг. Используя стандартные формулы для возрастания ошибки при определении увеличения массы фильтра, мы получили:

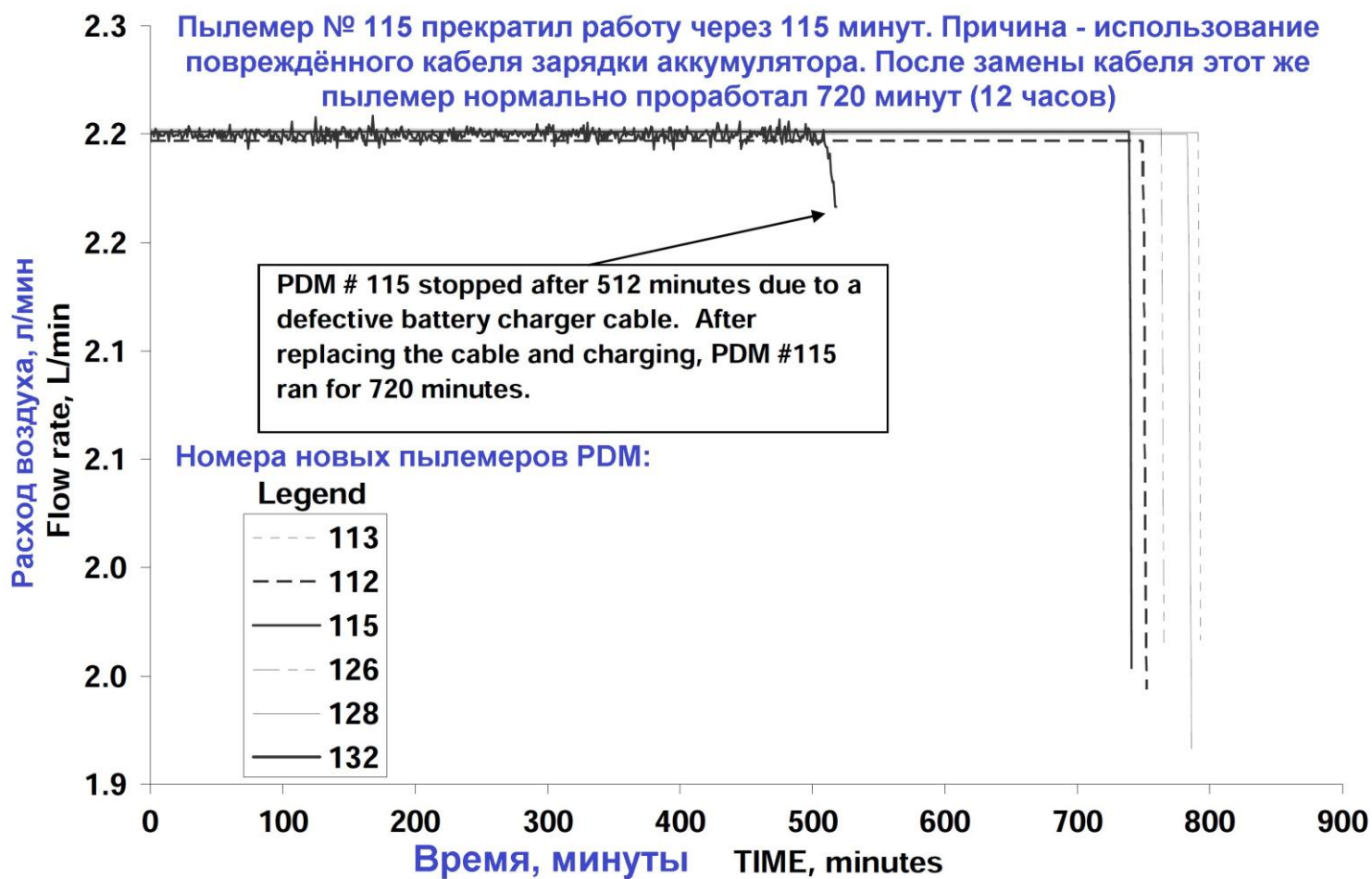
$$S_{filter} = 2 * ST = 8,2 \text{ мкг} \quad (5)$$

Коэффициент 2 получился потому, что для определения увеличения массы требовалось взвешивать фильтры 4 раза – 2 раза пробоотборный фильтр, и 2 раза незапылённый контрольный фильтр. Аналогично, при определении результатов измерений импактора, и с учётом наличия в нём 9 ступеней для улавливания пыли разного размера, получим (36 взвешиваний):

$$S_{impactor} = 6 * ST = 24,6 \text{ мкг} \quad (6)$$

Влияние разрядки аккумулятора

При преднамеренном использовании прибора так, чтобы произошла сильная разрядка аккумулятора, никаких видимых признаков отказов у новых пылемеров не обнаружилось. На измерение частоты колебания чувствительного элемента ТЕ небольшие изменения напряжения питания никакого влияния не оказали. Сравнение скорости увеличения массы у конкретного пылемера PDM с соответствующим значением у *TEOM 1400a* не выявило отличий в наклоне графика при разрядке аккумулятора. В наибольшей степени разрядка аккумулятора повлияла на снижение точности при работе насоса, прокачивавшего воздух. На Фиг. 5 показано, что расход воздуха снизился с номинального значения 2,2 л/мин $\pm 5\%$ до 0 л/мин менее чем за 2 минуты. Соответствующее изменение точности сепарации крупной пыли циклоном, вызванное изменением расхода воздуха (при ожидаемой разрядке аккумулятора за 8-часовую смену) составит 0,3%. Испытания также показали, что один из пылемеров смог проработать всего лишь 518 минут (до разрядки аккумулятора). Оказалось, что у него повреждён шнур питания зарядного устройства, и его потом заменили (перед проведением следующего испытания).



Фиг. 5. Испытания работоспособности пылемера при разрядке аккумулятора (до полной остановки), индикатор нормальной работы - правильный расход воздуха
Figure 5.—Battery testing to failure using flow rate as an indicator.

Подробные испытания нового пылемера в шахтах

Работоспособность (новых пылемеров) во время всего исследования

Испытания нового пылемера в шахтах проводились с ноября 2004 по август 2015г. В таблице 6 показаны результаты: общее число замеров, сделанное новыми пылемерами PDM в каждом их округов MSHA (с точки зрения добычи минеральных полезных ископаемых, территория США разделена на округа, которые не совпадают с административно-территориальным делением страны – прим.), число успешно выполненных замеров, их доля в общем числе замеров, и то, присутствовали ли представители Института. В приложении А приводятся сведения о результатах достоверных измерений концентрации пыли с указанием специальности шахтёра и шахты, где он работал. Эти измерения проводились во время выполнения типичной подземной работы, и проведение измерений не оказывало никакого негативного воздействия на выполнение работы. Представленные данные показывают результат общей оценки работоспособности программного обеспечения, электрической, механической, и физической систем нового пылемера PDM. На первой шахте, значительная ошибка программного обеспечения привела к последующим ошибкам, и в результате прибор мог обеспечить правильное измерение концентрации пыли лишь в 51% (случаев). (После этого) все приборы вернули на предприятие-изготовитель для устранения ошибки в программном обеспечении. Проведение испытаний в дальнейшем показало, что прибор выполняет корректное измерение запылённости с вероятностью от 86 до 97%, в среднем 93%.

Таблица 6. Общее число замеров, выполненных во время подробного исследования в шахтах, и число успешных (достоверных) замеров (с учётом присутствия или отсутствия представителей Института)

Округ MSHA	В присутствии сотрудников Института			В отсутствие сотрудников Института			Всего		
	Число замеров	Число успешных замеров	Доля успешных замеров, %	Число замеров	Число успешных замеров	Доля успешных замеров, %	Число замеров	Число успешных замеров	Доля успешных замеров, %
Подробные испытания в шахтах									
9	31	17	55	64	31	48	95	48	51
3	30	29	97	37	33	89	67	62	92
4	27	22	81	45	40	89	72	62	86
11	40	39	98	64	59	92	104	98	94
2	36	34	94	60	53	88	96	87	91
10	35	35	100	68	63	93	103	96	93
6	30	28	93				30	28	93
5	33	32	97				33	32	97
8	38	37	97				38	37	97
7	23	22	96				23	22	96
Расширенные испытания в шахтах*									
2(1)				9	4	44	9	4	44
9(1)				22	20	91	22	20	91
2(2)				26	23	88	26	23	88
9(2)a				7	7	100	7	7	100
9(2)b				9	3	33	9	3	33

* - в расширенных испытаниях участвовали шахтёры из шахт в округах MSHA 2 и 9 (по 2 шахты в каждом округе); а в округе 9 компания (2) испытала новые пылемеры в двух своих шахтах (9(2)a и 9(2)b)

После испытаний на шестой по счёту шахте оказалось, что доля результатов достоверных измерений немного отличается в случаях, когда замеры проводятся с участием специалистов Института, и когда проводятся без их участия. Институт, проконсультировавшись с (PDM Partnership), сделал вывод, что дальнейшие подробные испытания приборов в шахтах не требуют присутствия его представителей там в течение второй недели испытаний, и после этого представители Института присутствовали при испытаниях только первую неделю. Эти (подробные) испытания проводились в мае 2005г, после проводившихся ранее масштабных испытаний приборов в шахтах.

Расширенные испытания в шахтах

Расширенные испытания в шахтах проводились с июня по август 2005г. Результаты этих испытаний (число и доля достоверных замеров) приводятся в таблице 6. Эти результаты схожи с результатами подробных испытаний в шахтах – но более нестабильны. Это объясняется, главным образом, тем что при использовании одного пылемера PDM в шахте 2(1) и другого в шахте 9(2) произошли отказы, а сотрудники шахт не были обучены так, что не смогли распознать отказы. Из-за этого шахтёры продолжали использовать приборы, применение которых в нормальных условиях было бы прекращено. Наличие отказа у обоих пылемеров стало очевидно при просмотре файлов с результатами этих замеров.

Хотя не из всех шахт прислали отзывы шахтёров о новом пылемере (во время расширенных испытаний), но полученные отзывы в целом соответствуют тем отзывам, которые получили во время проведения подробных испытаний. Эти отзывы приводятся в разделе Обсуждение настоящего отчёта. Проведение этих испытаний показало, что ввод шнура электропитания в лампу на каске сбоку – не совместим с (защёлкой-креплением - *flip clip*), который используется в фильтрующих респираторах с принудительной подачей воздуха (которые применялись на одной из шахт). Когда у этих респираторов поднимали лицевой щиток, то (работа) этой защёлки-крепления (*flip clip*) зависел от натяжения шнура электропитания лампы на каске (чтобы обеспечить правильное направление луча света). Боковой ввод шнура электропитания у нового пылемера приводил к нарушению равновесия.

Надёжность работы новых пылемеров

25 новых пылемеров использовались, в общей сложности, в течение 10 926 часов, и из них 8 023 часов они работали под землёй. В среднем, каждый из приборов проработал по 437 часов (минимум - 246, максимум – 644 часа). Длительность использования конкретного изделия зависела от того, какие замеры с его помощью проводились. Первые сообщения о проведении ремонта, которые были до проведения доработки заводского программного обеспечения, не учитывали при подведении итогов о работоспособности приборов, так как эти сообщения относились к корректировке выпущенной продукции предприятием-изготовителем.

Итоговая информация об использовании пылемеров и их ремонте приводится в таблице 7. Для каждого из устройств приводится информация о длительности применения, и о виде ремонта. В таблице приводятся показатели ожидаемой частоты отказов, и ожидаемой критической частоты отказов (*critical repair rates*) на 1000 часов работы. Результаты приводятся в последовательности, соответствующей изменению частоты ремонтов приборов, от наиболее надёжных (вверху) к наименее надёжным (внизу). При этом в первую очередь учитывали серьёзные отказы (ремонты), а во вторую очередь – по общую частоту отказов (ремонтов). Все 25 пылемеров разделили на группы по 5 штук, в зависимости от частоты ремонтных работ. Самые исправные попали в верхнюю часть таблицы. Показаны средние суммарные показатели для групп, и для всех 25 приборов.

Частота отказов у новых пылемеров не была одинакова. Приборы, относящиеся к двум группам в верхней части таблицы, не требовали частого ремонта; а относящиеся к двум группам в нижней части таблицы, требовали более частого ремонта предприятием-изготовителем. Отказы приборов из нижней части таблицы можно отнести как к серьёзным, так и к небольшим, а у приборов из верхней части таблицы серьёзных отказов не было. У пылемеров из верхней группы средняя продолжительность работы до первого отказа составляла 506 часов. Определить надёжность этих приборов точно не удалось, так как за всё время проведения испытаний у них не было ни одного случая серьёзной неисправности.

В таблице 8 приводится суммарная информация о результатах успешного измерения запылённости для всех замеров, выполненных с помощью PDM. Для каждого прибора приводится общее число замеров, и число успешно выполненных замеров. Неудача при проведении измерений могла быть вызвана и отказом оборудования / повреждением, и ошибкой людей (неправильная установка фильтра). Информация упорядочена так, что вверху таблицы приводятся результаты для наиболее успешно выполнявшихся доли измерений. И в этой таблице информация сгруппирована так, что результаты относятся к группам пылемеров по 5 штук, и приводятся средние значения для этих групп, и для всех пылемеров вместе. Для всех 25 приборов, и всех 1202 замеров, доля успешных замеров – 90,18%. В верхней группе из 5 наиболее хорошо работавших приборов, доля успешных замеров была от 100 до 92,42%. Результаты, представленные в таблицах 7 и 8, являются независимыми оценками надёжности новых пылемеров. Частота ремонтов приборов не вполне согласуется с долей успешно выполненных замеров, поскольку специалисты Института вмешивались в проведение испытаний – чтобы предотвратить повторение некорректных измерений тогда, когда обнаруживались сбои. Кроме того, часть отказов была незначительна и легко устранима (без привлечения изготовителя).

Таблица 7. Итоговая информация о применении новых пылемеров и их ремонте (техобслуживании)

Номер пылемера	Общее число ремонтов	Небольшой отказ	Серьезный отказ	Общая продолжительность работы, часов	Суммарное число ремонтов на 1000 часов работы	Суммарное число серьезных отказов на 1000 часов работы
111	1	1	0	612,25	1,63	0,00
114	1	1	0	512,00	1,95	0,00
135	1	1	0	505,00	1,98	0,00
126	1	1	0	482,25	2,07	0,00
130	1	1	0	418,50	2,39	0,00
Среднее	1,00	1,00	0,00	506,00	2,01	0,00
125	1	1	0	392,50	2,55	0,00
124	1	1	0	390,75	2,56	0,00
115	1	1	0	315,25	3,17	0,00
116	2	2	0	581,25	2,44	0,00
127	1	1	0	246,00	4,07	0,00
Среднее	1,00	1,00	0,00	385,15	3,16	0,00
112	2	2	0	445,75	4,49	0,00
120	2	2	0	416,25	4,80	0,00
131	2	2	0	384,50	5,20	0,00
128	3	3	0	328,25	9,14	0,00
133	2	1	1	643,75	3,11	1,55
Среднее	2,20	2,00	0,20	443,70	5,35	0,31
102	2	1	1	581,00	3,44	1,72
122	3	2	1	515,25	5,82	1,94
123	2	1	1	408,25	4,90	2,45
105	2	1	1	406,00	4,93	2,46
113	3	2	1	399,25	7,51	2,50
Среднее	2,40	1,40	1,00	461,95	5,32	2,22
119	2	1	1	383,50	5,22	2,61
132	3	2	1	373,00	8,04	2,68
110	4	3	1	361,00	11,08	2,77
109	3	1	2	503,50	5,96	3,97
108	3	1	2	321,25	9,34	6,23
Среднее	3,00	1,60	1,40	388,45	7,93	3,65
Общее среднее	1,96	1,44	0,52	437,05	4,75	1,24

Таблица 8. Количество и доля успешно выполненных замеров

Номер нового пылемера	Общее число замеров	Число успешных замеров	Доля успешных замеров, %
131	42	42	100,00
135	56	55	98,21
108	36	35	97,22
127	33	32	96,97
105	43	41	95,35
Среднее			97,55
126	49	46	93,88
116	61	57	93,44
125	45	42	93,33
114	55	51	92,73
111	66	61	92,42
Среднее			93,16
132	39	36	92,31
102	64	59	92,19
112	51	47	92,16
128	33	30	90,91
119	39	35	89,74
Среднее			91,46
123	47	42	89,36
122	56	50	89,29
115	42	37	88,10
133	70	61	87,14
109	54	47	87,04
Среднее			88,18

130	46	40	86,96
110	37	31	83,78
120	46	38	82,61
124	45	36	80,00
113	47	33	70,21
Среднее			80,71
Всего замеров	1202	1084	
Средняя доля успешных замеров			90,18

Точность измерений в подземных условиях

В таблице 9 приводятся результаты статистического анализа изменчивости ANOVA. Показаны относительные стандартные отклонения RSD в Lippmann chamber, который использовали при отборе проб во время проведения подробного исследования новых пылемеров в шахтах. При проведении этого анализа использовали результаты, которые (полностью) приводятся в приложении В. Относительные стандартные отклонения RSD у нового пылемера PDM: 0,078 (95% доверительные пределы 0,066 и 0,095). Kissell and Sacks [2002]²⁸ заявили, что для результатов (измерений), которые соответствуют нормальному распределению, погрешность измерений 35% (и ниже) обеспечивается при значении относительного стандартного отклонения RSD от 0,125 и менее. У пылемера CMDPSU при расходе воздуха 2 л/мин значение относительного стандартного отклонения RSD было 0,052, что схоже со значением, полученным ранее в работе Kogut et al. [1997]²⁹ (там оно было 0,046 при запылённости более 0,5 мг/м³). Наибольшее значение RSD у пылемера CMDPSU (0,082) было при расходе воздуха 1,7 л/мин из-за нескольких результатов, которые внесли значительное искажение, и выглядели аномальными – но никаких причин для их исключения из обрабатываемых замеров не было.

Таблица 9. Результаты измерений в производственных условиях – точность.

Пылемер	Число замеров	RSD	95% доверительные пределы
Новый пылемер PDM	88	0,078	0,066–0,095
CMDPSU: при расходе воздуха 2 л/мин	89	0,052	0,044–0,063
CMDPSU: при расходе воздуха 1,7 л/мин	90	0,083	0,070–0,101

Обсуждение

Погрешность измерений прибора

Измерение массы пыли в новом пылемере основывалось на использовании первого закона физики (уравнение 1). Поэтому, теоретически, можно было бы ожидать, что погрешность измерений будет отсутствовать. Но у многих электронных приборов наблюдается систематическое расхождение между средним результатом многократных измерений, и истинным значением измеряемой массы. Эту погрешность определили и для нового пылемера PDM, и сделали коррекцию результатов измерения в соответствии с рекомендациями Bartley et al. [2003]³⁰; и предел «расширенных» значений неопределённости и чувствительности (*accuracy*) могут быть равны оригинальным значениям (*expanded uncertainty and accuracy limit can be equivalent to the original determinations*). Выполнение коррекции систематической погрешности результатов измерений нового пылемера дополнительно повысило точность (измерений) новых пылемеров.

В начале этой работы (мы) допустили некоторые технические «компромиссы» для того, чтобы проводить точные и «чувствительные» замеры концентрации пыли в шахтах. Один из таких компромиссов – осаждение респираторной пыли в воздуховоде, соединяющем воздухозаборник на лампе на каске с циклоном (сепаратором крупной не-респираторной пыли). Для уменьшения такого осаждения можно использовать воздуховод из электропроводного материала, что уменьшит электростатическое осаждение, и изменить конструкцию воздуховода так, чтобы воздух двигался со скоростью, уменьшающей осаждение пыли. В работе Peters and Volkwein [2003]³¹ это осаждение было вычислено и измерено, и оно составило около 2% от респираторной пыли. Другой причиной осаждения частиц мог стать воздухоподогреватель, находящийся между циклоном и фильтром микровесов пылемера. Эту причину не изучали отдельно (количественно) – она входила в общее суммарное значение погрешности. Результат измерений нового пылемера имел отрицательную погрешность, и это согласуется с физическим осаждением небольшой доли частиц на участке движения от циклона к фильтру микровесов. Такое осаждение зависит от того, каково распределение частиц пыли по размерам. Результаты, полученные и при проведении исследований в лаборатории, и при подробном исследовании в шахтах показали, что осаждение частиц пыли в новом пылемере незначительно. Поэтому технические компромиссы оказали минимальное влияние на точность измерений нового пылемера (по сравнению с другими методами измерений).

Причины увеличения погрешности измерений после того, как приборы использовались в шахтах, могут быть различны: Во-первых, это отличия калибровки значения К0. Это объясняет большую погрешность у части – но не у всех – новых пылемеров. Во-вторых, изготовитель обнаружил, что уплотнительная прокладка между циклоном и пылемером может расширяться (выступая в полость воздуховода), что может влиять на характер движения воздуха, и может стимулировать осаждение частиц пыли. Наконец, у одного из пылемеров, который не соответствовал требованиям к 95% верхнему доверительному пределу, коническое выходное отверстие в циклоне было загрязнено герметиком, что создавало завихрения, и могло влиять на улавливание пыли. Вне зависимости от (возможных) причин, рекомендуется проводить периодическую калибровку, регулярные проверки и очистку пылемера.

Точность

Было высказано предложение, откорректировать значения точности нового пылемера, полученные во время его применения в шахтах, чтобы учесть то, что (часть) пылемеров могла поступить от изготовителя (в таком состоянии), что они не соответствовали исходным требованиям Института к точности измерений. Обосновывалось это предложение тем, что большинство пользователей не в состоянии обнаружить этот недостаток, и в результате это может повлиять на точность измерений. Новое значение относительного стандартного отклонения RSD_{new} вычислили по формуле:

$$RSD_{new} = \{ RSD_{field} + [n_{fail} / (100 * n_{total})] * (RSD_{field} / RSD_{lab}) \} \quad (7)$$

$$RSD_{new} = \left(RSD_{field} + \frac{n_{fail}}{100 n_{total}} \left(\frac{RSD_{field}}{RSD_{lab}} \right) \right)$$

Лишь у одного из новых пылемеров погрешность измерений не соответствовала начальному 95% критерию (точности измерений – верхнему 95% доверительному пределу). Большая точность измерений в лабораторных условиях привела к небольшому изменению точности измерений в производственных условиях - от 0,0780 до 0,0786. Кроме того, (мы использовали) «предпродажную версию» пылемера, и можно ожидать, что при увеличении объёма выпуска приборов система контроля качества на заводе-изготовителе улучшится, что уменьшит погрешность измерений в производственных условиях. Поэтому такое предложение (о корректировке точности измерений в шахтах) не имеет большого значения.

Обучение и отзывы

Обучение тому, как использовать новый пылемер PDM, занимало на шахтах от 30 до 45 минут. Это обучение было важным не только для того, чтобы гарантировать, что шахтёры знают, как использовать пылемер, но и потому, что оно позволяло представителям Института узнать, какие опасения вызывает новый прибор у шахтёров, и какие (по их мнению) у него есть недостатки. Шахтёров просили сообщить их мнение и то, как они оценивают применение пылемера, представителям Института.

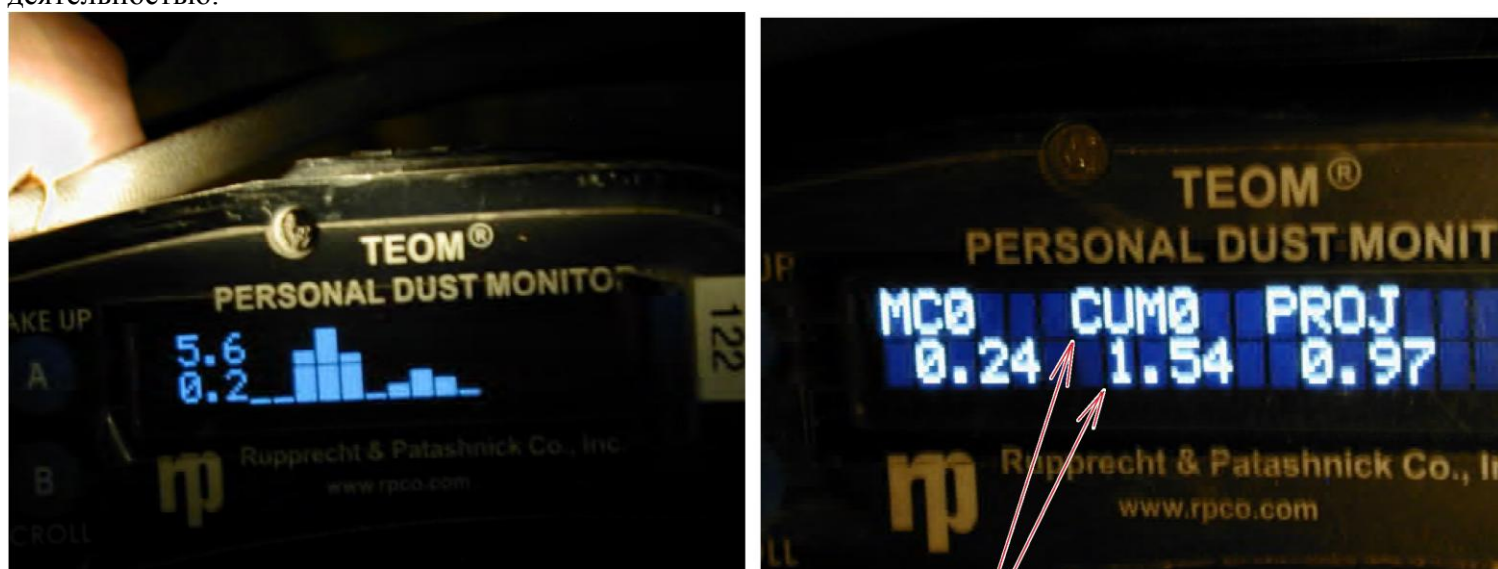
Одним из самых главных вопросов было то, насколько новый пылемер будет удобен для шахтёров, смогут ли они его использовать. Кроме того, впервые шахтёры получили возможность получать своевременную и точную информацию о запылённости вдыхаемого воздуха. Во время проведения этого исследования представители Института имели возможность общаться с шахтёрами в неофициальной обстановке, и узнать – что они думают о приборе при его использовании. В результате общения исследователи, работавшие в шахтах, делали короткие записи с отзывами о новом приборе. Первой реакцией на новое устройство (при первоначальном обучении его использованию) были сомнения и недоверие к тому, что прибор имеет (небольшие вес и размеры), и что он вмонтирован в лампу на каске, и что он будет полезен. К концу подробного исследования пылемера в шахтах, большинство шахтёров считали, что им лучше работать с новым пылемером PDM (в основном потому, то в отличие от применявшихся ранее пылемеров он несколько не мешал им работать).

Реакция шахтёров на новый пылемер была разной – от полного безразличия (они относились к прибору как к лампе на каске) до активного вовлечения в испытания (они старались вносить изменения в выполнение работы в зависимости от результатов измерений пылемера). Один из шахтёров (оператор комбайна) сказал, что он смотрит на показания пылемера после каждого цикла работы транспортной машины, перевозящей уголь. Некоторые из шахтёров, которые обслуживали буровые станки (для крепления кровли) были удивлены – в ряде случаев они работали в запылённой обстановке, но сами это не замечали. Один из рабочих (rock duster) был удивлён тому, что запылённость (в зоне дыхания) низкая – хотя ему казалось, что он работает в очень пыльных условиях. Большинство шахтёров, смотревших на показания пылемера, считали что это полезный прибор. Один из бригадиров использовал результат измерений для того, чтобы оптимизировать движение по грунтовым дорогам чтобы снизить воздействие пыли.

В нескольких случаях шахтёры сказали, что искривлённый корпус пылемера компенсирует его несколько больший вес по сравнению с весом стандартного свинцового аккумулятора шахтёрской лампы. Один из слесарей пожаловался на то, что новый пылемер более громоздкий, чем аккумулятор лампы, и (из-за) этого на поясе остаётся меньше места для инструмента. Шахтёры говорили, что качество и яркость лампы на каске хорошие, но многим не нравилось то, что нельзя фокусировать свет (особенно тогда, когда имевшаяся фокусировка была неправильной). Обычно шахтёрам нравились лампы старого типа – большие, с резервной лампой – а не белые светодиодные лампы нового пылемера. Один из шахтёров предложил сделать светодиодную лампу зелёной, чтобы лучше видеть в условиях загрязнённой атмосферы. В отличие от результатов испытаний прототипа пылемера, во время этих испытаний было несколько жалоб на шум, создаваемый насосом. Причём эти жалобы чаще исходили не от тех, кто работает в забое, а тех, а тех, кто работает в удалённых от забоя местах. На шум чаще реагировали во время обеденного перерыва, но он не вызывал сильного раздражения. Выхлопное отверстие насоса (основной источник шума) – остронаправленное, и на него легко установит глушитель так, что это не повлияет на расход воздуха. Часто жаловались на то, что шнур лампы на каске слишком длинный. Этот длинный шнур выбрали специально потому, что хотели, чтобы пылемер мог использоваться шахтёрами большого роста. При установке более короткого шнура(во время расширенных испытаний в шахтах) – стали жаловаться, что он слишком короткий. Нужно сделать так, чтобы в поступающих в продажу пылемерах шнур можно было легко заменить. Были жалобы на то, что шнур очень жёсткий, и раздражает шею шахтёра, когда воздух в шахте влажный.

Представление информации на экране

На Фиг. 6 показан экран дисплея. На нём отображаются результаты измерений в разном формате. Шахтёры по-разному реагировали на представление результатов измерений в разном виде. Одним больше нравилось графическое представление результатов; другим – цифровое. Обозначения, использовавшиеся для описания результатов измерений (в цифровом формате) сбивали (шахтёров) с толку. На основе проведённых измерений (мы можем) сказать, что средняя за замер концентрация пыли в конкретный момент времени (то есть – отношение массы пыли к объёму прокачанного воздуха, за период от начала смены до текущего момента, CUM0), достаточно хорошо предсказывает среднесменную концентрацию EOS (за всю смену) – начиная с середины смены, при стабильных условиях работы. С другой стороны, среднесменная концентрация (projected concentration PROJ), которая математически равна отношению массы пыли к объёму воздуха, прокачанного за всю смену, не может считаться прямой оценкой среднесменной концентрации. Возможно, эту величину правильнее назвать «предельной концентрацией» (limit concentration). Вне зависимости от того, как называть этот параметр, его величина не (сильно) изменяется при изменении концентрации, а постепенно приближается к истинному значению среднесменной концентрации EOS. Если значение CUM0 превышает значение ПДК (PEL), требуется принять меры для снижения воздействия пыли так, чтобы оно не превысило ПДК до конца смены. Но сразу после превышения граничного значения (PROJ) - обеспечить снижение воздействия пыли до ПДК становится уже невозможно. Несмотря на сбивающие с толку обозначения, шахтёры быстро разобрались, как показания прибора (в разных форматах) связаны с их деятельностью.



CUM0 - Средняя концентрация респираторной (мелкодисперсной) пыли за время измерений (то есть - от начала смены до текущего момента), мг/м³

Фиг. 6. Отображение результатов измерений и вычислений на дисплее нового пылемера PDM. Слева - в графической форме, справа - в численном виде.

Figure 6.—Basic PDM screen display formats and information presented.

Left: graphic format; right: numeric format.

Проблемы при использовании нового пылемера

При испытании в шахтах (мы) столкнулись с некоторыми техническими и организационными проблемами, которые могут повлиять на применение нового пылемера, и на то, будут ли сообщать, что он мешает/раздражает шахтёров. В таблице 10 приводятся эти проблемы, и те действия, которые были предприняты для их решения. При использовании любого нового оборудования (особенно в таких сложных условиях, как шахты), подобные проблемы могут быть выявлены только при практическом применении прибора. Переход на применение нового пылемера CMDPSU в горной промышленности займёт несколько лет, в течение которых проблемы будут выявляться и устраняться, а новая технология доводится до совершенства. (Проведённая нами) проверка прототипа и «предпродажной» версии прибора в условиях шахт, вероятно, выявила не все потенциальные проблемы. Но мы надеемся, что проведённые испытания ускорят процесс освоения этой новой технологии.

Таблица 10. Проблемы при использовании нового пылемера, и комментарии

Проблемы	Комментарии
Регулирование температуры (воздуха) в датчике микровесов	Перепаляли соединение датчика температуры, нагреватель исправен
Неисправность дисплея	Плохой контроль качества у поставщика, стали брать их у другого поставщика; заменили все кнопки и предохранители
Неисправность кнопок	Заменили часть дисплея
Новый пылемер не смог установить связь с компьютером	После первого испытания в шахтах изготовитель заменил программное обеспечение
Неисправность аккумулятора	Заменили аккумулятор
Преждевременный отказ лампы на каске	Изменили толщину нити накаливания; отправили в MSHA для сертификации
Отсутствие измерений в файле с результатами работы	Эта неисправность не повторялась, возможная причина – фильтр некорректно установили на микровесы
Плохо заряжен аккумулятор	Проблема или с аккумулятором, или с зарядным устройством
Проблемы при зарядке, неправильная индикация степени зарядки из-за плохого контакта в разъёме	Почистили контакты, спроектировали самоочищающиеся контакты. Улучшили программное обеспечение, управляющее зарядкой аккумулятора
Сильное запыление фильтра в начале испытаний	Некорректная установка фильтра
Разбилось входное отверстие на циклоне	<i>Add better strain relief at inlet</i>
Соскочила трубка с входного отверстия циклона	<i>Add better strain relief at inlet</i>
Плохая фокусировка лампы на каске	<i>(Устранили проблему - Reshim bulb)</i> ; проинструктировали слесаря – как проводить фокусировку.
Не обнаружили чувствительный элемент микровесов	Спроектировали более плотное соединение чувствительного элемента TE
Проверка герметичности (воздуховода) показала наличие неплотности	Обнаружилась утечка (воздуха) в месте соединения циклона и пылемера, загерметизировали место утечки герметиком – нужно изменить конструкцию этого места.
Несовместимость (нового пылемера) с новыми системами дистанционного управления (горными машинами)	Изготовитель переделал кабель питания пылемера так, чтобы дистанционное управление было совместимо с пылемером
Кабель питания лампы на каске очень длинный, или очень короткий	Изготовитель предложил кабели разной длины, или кабели, которые можно регулировать в производственных условиях.

Файлы с результатами измерений

Скачивание файлов

При использовании программного обеспечения WinPDM для скачивания результатов измерений с пылемера в компьютер, пользователю предоставляется возможность выбора. Он может распечатать «карту измерения запылённости» (Фиг. 7). Она выглядит как используемая сейчас карта измерения запылённости, но в ней дополнительно приводятся все сообщения о возможных ошибках, и сведения о воздействии пыли на момент окончания смены (EOS). В рассмотренном случае, воздействие (респираторной) пыли составило 0,73 мг/м³. Прибор показывает, как был завершён каждый из замеров (по индикации кода ошибки – если она была - в соответствующем поле для таких сообщений). В рассмотренном примере, в этом поле появилось сообщение «Program end of sample». Так как нормальное завершение замера не является ошибкой, то (появление) такого сообщения в таком поле – неправильно. При желании, пользователь может визуально проверить графики разных параметров, таких как концентрация, масса, расход воздуха, давление, наклон – как они изменялись с течением времени. Эту возможность использовали нечасто (при проведении данного исследования), но она полезна для быстрой проверки того, что произошло за смену. Наконец, результаты могут быть сохранены в виде текстового файла в формате с запятой-разделителем (*comma-separated version .CSV*). Такие файлы можно заархивировать, или изучить (используя стандартные программы типа Excal).

Отчёт (распечатка) о результатах измерения концентрации пыли
(пылемер PDM № 123)

Dust Data Card: (Serial Number 0123)

1. Wearer ID

1036

Идентификационный номер шахтёра

2. Mine ID Number

01 00759

Идентификационный номер шахты

3. Contractor Code

000

Кодовый номер
подрядчика

4. Mine Name

[Redacted]

#1 Название шахты

5. Company Name

[Redacted]

Название компании

6. Date Sampled

01 25 05

Дата проведения замера (месяц, день, год)

7A. Sampling Start Time

06

Время начала замера

7B. Sampling Time (min)

480

Длительность
замера, мин

8. Time This Shift

9. Type of Sample (select one) Вид замера запылённости:

(1) designated occ (ug) У шахтёра определ. 0 специальности

(2) nondesignated occ (ug)

(3) designated area (ug) На определённом месте

(4) designated work position На определённом месте работы

(5) part 90 miner Замер для проверки выполнения санитарно-гигиенических требований
государственного стандарта по охране труда шахтёров к запылённости

10. MMU DA/SA

017 0

(номер горной машины?)

11. Occ Code

036

Кодовый номер
специальности
шахтёра

12. Part 90 Miner Sampled

SSN

[Redacted]

Номер замера, проводившегося для проверки
соблюдения требований
законодательства, ограничивающего
концентрацию респираторной пыли в зоне дыхания шахтёра

13. Certified Person: NOTICE - Knowingly making any false statement, representation, or certification on this document is a violation of the federal criminal code which may be punished by a fine or by imprisonment or both.

SSN

[Redacted]

Примечание: учтите, что внесение в этот документ недостоверной информации

Signature

является уголовным преступлением, и может быть наказано штрафом; или лишением свободы; или и тем, и другим вместе.

X Подпись

14. Results Результаты измерений:

Actual Exposure: 0.733831 mg/m³

Средняя за время замера концентрация респираторной (мелкодисперсной) пыли
0,733831 мг/м³

15. Errors Ошибки в работе пылемера:

14:00:01 01/25/2005, Program end of sample

в 14:00:01 25 января 2005г программа остановила проведение замера

Notes:

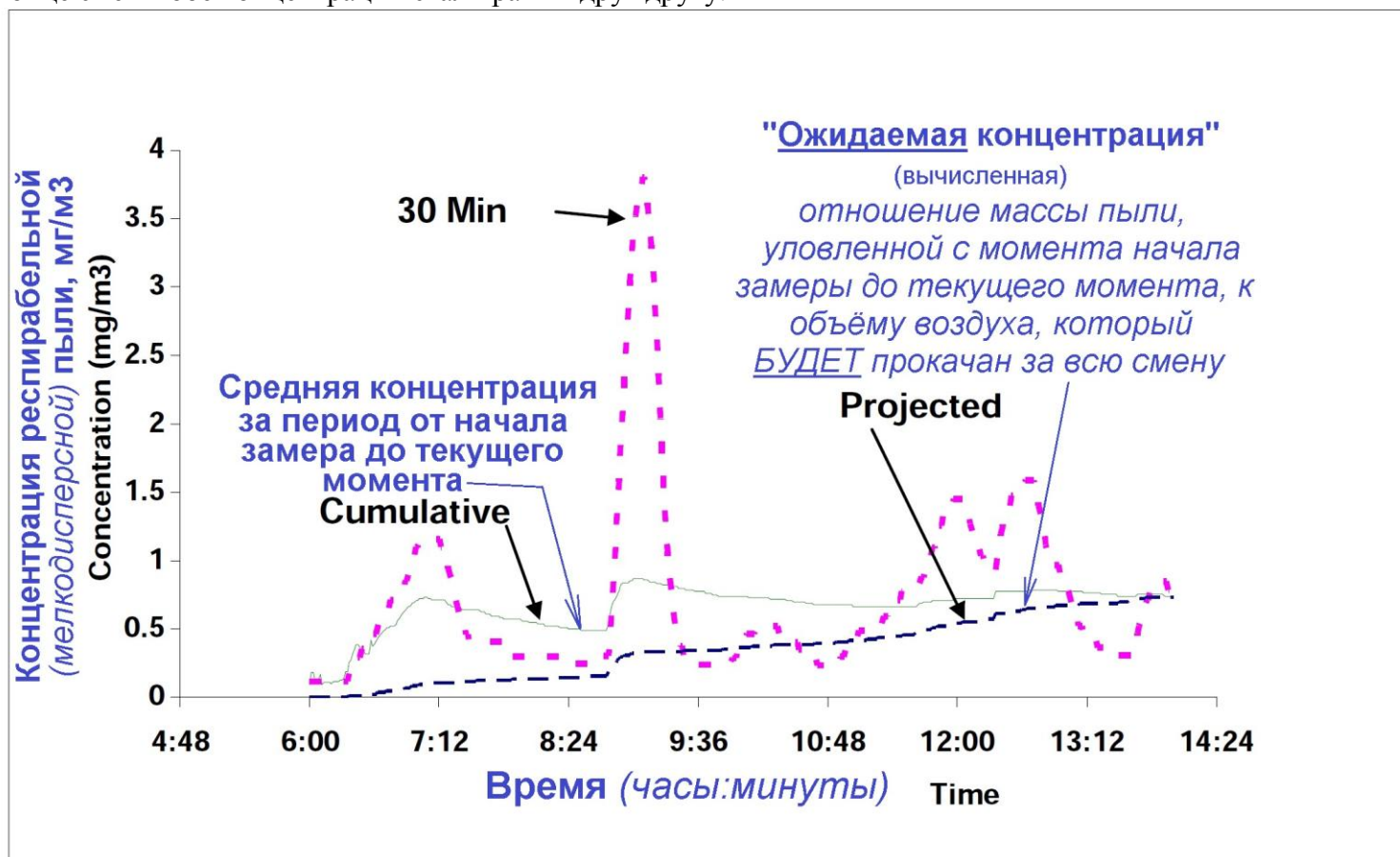
Примечания:

Фиг. 7. Пример распечатки результатов измерений

Figure 7.—Example of data printout. (MMU = mining machine unit. DA = designated area. SA = surface area.)

Интерпретация

Можно построить графики изменения параметров, используя информацию из текстовых файлов. На Фиг. 8 показаны такие графики, полученные с помощью данных из файла, соответствующих измерениям, показанным на Фиг. 7. Эти графики показывают, как повлиял на результат измерений резкий рост запылённости в 9:00. Эти сведения показывают, как резкое кратковременное увеличение запылённости в 9:00 повлияло на значения накопительной и текущей концентрации пыли. Значения накопленной концентрации после уменьшения запылённости также снизились, а значения текущей – продолжали расти. В конце смены обе концентрации стали равны друг другу.



Фиг. 8. Подробная запись изменения запылённости во время замера, (к которому относится распечатка Фиг. 7)

Figure 8.—Detail of results from sample shown in Figure 7.

Фиг. 8. Показано влияние кратковременного увеличения концентрации пыли в 9 часов. После уменьшения запылённости, средняя концентрация (от начала смены до текущего момента) уменьшилась, а «ожидаемая среднесменная концентрация» не снизилась, а продолжала возрастать.

Самодиагностика нового пылемера

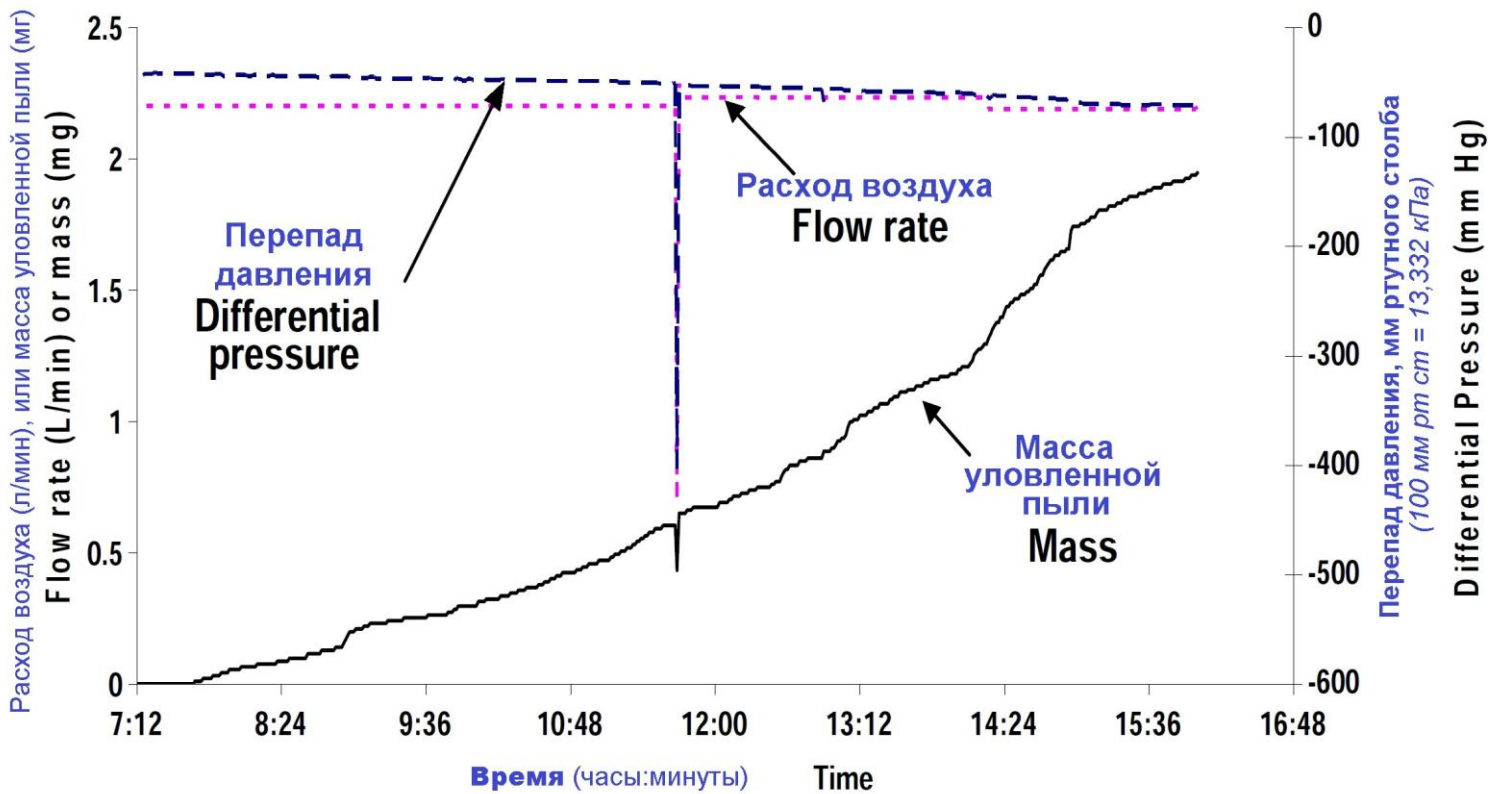
Сведения о параметрах работы и их интерпретация

Новый пылемер автоматически определяет и может сообщить о многих полезных параметрах как самого прибора, так и окружающей среды. Эти параметры могут быть выбраны или изготовителем, или уполномоченным пользователем, и они могут записываться в память с требуемой периодичностью. Компания-изготовитель ТЕС обеспечивает «базовый шаблон», или файл, содержащий данные о работе и настройках прибора, который дополняет «диагностический шаблон», используемый для поиска и устранения неполадок устройства. Эти шаблоны можно регулировать так, чтобы они обеспечивали индикацию о разных видах неполадок (для различной степени нарушения нормальной работы, и для разных интервалов проверки работоспособности).

Различение достоверных результатов измерений от недостоверных

Важным вопросом является то, как использовать информацию о работе прибора для определения того, достоверен ли результат конкретного замера, или нет. В конечном итоге, выбор таких критериев осуществляет пользователь прибора. Те пылемеры, которые были прототипами, и те, которые были (испытаны) до поступления в продажу, по-разному определяли наличие ошибок. Сначала думали, что для обеспечения контроля за достоверностью измерений можно поставить датчик, который бы определял – переворачивался ли пылемер, или нет. При переворачивании уловленные циклоном крупные частицы могут вывалиться из ёмкости для пыли, и попасть на чувствительный элемент (как показали данные, приводимые в приложении С, это изредка происходит). Но использование прототипа показало, что этот метод не подходит, так как он даёт частые ложные сообщения о наличии ошибок. Попадание крупных частиц на фильтр не только искажает результат измерений (нужно измерять концентрацию мелкой респираторной пыли, а они крупные и не-респираторные), но также приводит к чрезмерному и мгновенному увеличению массы пыли на фильтре. Для новых вариантов пылемера, изготовленных до начала коммерческой продажи, был предложен альтернативный способ устранения ошибок – вместо определения наклона прибора. Программное обеспечение стало анализировать скорость изменения массы пыли на фильтре, и сообщать о резком возрастании. Таким образом, новый алгоритм контролирует не возможность появления ошибки измерения (переворачивание прибора, которое может вызвать загрязнение фильтра крупными частицами), а саму ошибку (попадание крупных частиц на фильтр). При проверке сначала запрограммировали сигнализацию об ошибке при возрастании массы респираторной пыли на более чем 5 мкг за интервал 2 минуты. Получилось, что сигналы об ошибках поступали часто – и даже тогда, когда результат измерений был совершенно правильный (например, когда шахтёр заходил в область удаления сильно запылённого воздуха из забоя). Поэтому программу изменили – сигнал об ошибке стал выдаваться при увеличении массы на 100 мкг за 1 минуту. Это привело к тому, что во второй период проверки в шахтах, был лишь один случай срабатывания этой сигнализации. Внесённое изменение значительно снизило частоту сообщений о неполадках – но и при таком изменении полученные вполне достоверные результаты могли попасть в разряд недостоверных. Поэтому, вероятно, следует ещё больше увеличить значение изменения массы, рассматриваемое как ошибка при измерениях.

Также оказалось, что когда отверстие для всасывания воздуха в пробоотборной трубке закрывали, то возникавшее быстрое увеличение разрежения в измерительной части прибора приводило к ошибочному «увеличению» массы пыли на фильтре, и приводило к появлению сообщения об ошибке. Это показано на Фиг. 9, где приводится изменение давления и массы. Заметим, что после того, как входное отверстие открывалось, результат измерения воздействию за смену – не зависел от того, было (временное) перекрытие прохода воздуха. Также отметим, что при таком перекрывании может произойти уменьшение расхода воздуха, прокачиваемого насосом прибора. Используя эту информацию, изготовитель должен улучшить алгоритм определения ошибок измерения массы пыли так, чтобы он игнорировал случаи кратковременного появления разрежения. Если длительность перекрытия прохода воздуха превысит 2 минуты, возникнет ошибка измерения расхода воздуха, и сделанный замер может попасть в категорию некорректных. Аналогично, алгоритм должен выявлять сочетание сообщений о переворачивании прибора и о резком возрастании массы пыли на фильтре – так, чтобы это сочетание приводило к появлению сообщения о недостоверности результатов измерений.



Фиг. 9. Ошибка при измерении массы уловленной пыли, возникающая из-за перекрытия прохода воздуха по воздуховоду, и последующего восстановления движения воздуха

Figure 9.—Mass offset "error" resulting from pinched tube and subsequent recovery of correct mass measurements.

Сейчас MSHA использует базу данных по замерам запылённости, в которой некорректные и корректные замеры можно отличить по их кодировке. Анализ данных из этой базы (см. приложение С) по замерам, сделанным в период с 1994 до 2004г, показал, что доля корректных замеров, сделанных инспекторами и работодателем, составляет 92,3% и 83,1% (для общего числа замеров 381 335 и 487 713) соответственно. Учитывая причины некорректности сделанных замеров, и повышенную точность и надёжность прибора PDM, мы считаем, что использование нового пылемера позволило бы снизить частоту некорректных замеров примерно в два раза.

Техническое обслуживание

Из-за того, что в изделие постоянно вносились измерения для улучшения его свойств, информация о периодичности техобслуживания приборов во время проведения этого исследования не подойдёт для оценки периодичности таких работ при эксплуатации новых версий прибора в будущем. Можно ожидать, что улучшение конструкции и исполнения таких пылемеров приведёт к устранению выявленных недостатков, и тогда все приборы станут соответствовать показателям, полученным сейчас для наибольших квантилей (то есть – данным о наибольшей периодичности проверенных сейчас приборов – прим.).

Калибровка

Расход воздуха

Пробоотборный насос нового пылемера не требует проведения частой калибровки. Первоначальная калибровка каждого из приборов была сделана в конце осени 2004г, а затем все приборы вернули изготовителю для обновления их программного обеспечения. При анализе полученных результатов мы не использовали информацию, полученную до этой калибровки. Сведения о повторных калибровках, и о длительности применения приборов, отсчитываются от момента времени, когда обновлялось программное обеспечение. При оценке погрешностей расхода воздуха при стандартном расходе 2,2 л/мин, мы использовали два критерия. Первый – погрешность расхода $\pm 1\%$ - использовалась для лабораторной проверки и проверки точности измерений; второй – погрешность $\pm 5\%$ - для случаев применения прибора в шахтах, так как этот критерий используют для применяемых там сейчас персональных пробоотборных насосов CMDPSU. В таблице 11 показаны сведения о калибровках, погрешность измерения расхода воздуха, и длительности применения 10 пылемеров. Все приборы были изначально откалиброваны на предприятии-изготовителе. Кроме того, несколько приборов были позднее откалиброваны исследователями. Лишь один из пылемеров потребовал калибровки из-за того, что погрешность расхода воздуха превысила 5%. Три прибора откалибровали для того, чтобы они обеспечили погрешность не выше 1%. Общая продолжительность работы всех 10 пылемеров, показанных в таблице 11, составила 3 354 часов.

Таблица 11. Информация о калибровках по расходу воздуха

Номер прибора PDM	Повторная калибровка расхода воздуха при погрешности 1%–5%	Повторная калибровка расхода воздуха при погрешности >5%	Суммарная продолжительность работы (часы)
111	0	0	459,25
114	0	0	455,50
135	0	0	392,25
126	0	0	321,75
130	0	0	299,75
125	0	0	339,25
124	0	1	264,50
115	1	0	204,25
116	0	0	419,75
127	2	0	197,75
Всего	3	1	3354,00
Периодичность калибровки, обеспечивающая погрешность измерения расхода воздуха $\pm 1\%$			239,57
Периодичность калибровки, обеспечивающая погрешность измерения расхода воздуха $\pm 5\%$			838,50

Сейчас инспектора MSHA и администрация угольных шахт проверяют расходы воздуха у используемых ими персональных пробоотборных насосов через каждые 200 часов их работы. Хотя информации в таблице 11 недостаточно для того, чтобы точно определить периодичность проведения калибровки нового пылемера в отношении расхода воздуха, она позволяет оценить значения такой периодичности. Для 10 испытанных приборов, проведение периодической калибровки каждые 240 часов работы позволит обеспечить соответствие критерию $\pm 1\%$, а при калибровке каждые 840 часов - $\pm 5\%$. На основе этой информации можно сказать, что калибровка расхода воздуха должна проводиться с периодичностью 240-840 часов работы. Стабильность расхода воздуха у насосов, используемых в новом пылемере, ничуть не ниже стабильности расхода воздуха у насосов персональных пробоотборников, используемых сейчас, и их не придётся проверять чаще, чем насосы персональных пробоотборников.

Масса пыли на фильтре

Для получения достоверных результатов при использовании нового пылемера требуется проводить периодическую калибровку весов в лабораторных условиях. Также потребуется периодически проводить углубленное обследование прибора для того, чтобы обеспечить соответствие его показаний предъявляемым требованиям. Результаты проведённых измерений показали, что калибровка должна будет проводиться периодически, но имеющейся информации недостаточно для того, чтобы определить интервал между калибровками. Если будет проводиться простая проверка прибора, то имеет смысл проводить её одновременно с проверкой расхода воздуха. По мере накопления опыта использования нового пылемера на рабочих местах, можно будет пересмотреть значение периодичности проверки (калибровки) измерения массы уловленной пыли.

Выводы

Испытания в лабораторных условиях и на рабочих местах под землёй показали, что разработан новый прибор, позволяющий получать точный результат в реальном масштабе времени. В сотрудничестве с профсоюзными организациями, государственными учреждениями и промышленностью, была разработана программа испытаний, которая показала, что в лабораторных условиях погрешность измерений пылемера PDM составляет $\pm 25\%$ с доверительной вероятностью 95%. Также испытания показали, что после длительного применения под землёй точность измерений в лабораторных условиях не отличалась от первоначальной. Но оказалось, что у некоторых изделий погрешность измерений вышла за пределы 95% доверительной вероятности, и предположительно, это произошло из-за изменения погрешности измерений. Поэтому рекомендуется проводить периодическую калибровку прибора.

Проведение испытаний под землёй, когда пылемер использовался шахтёрами во время обычного выполнения работы, показали что прибор надёжно работает в течение длительных интервалов времени, и доля успешно выполненных достоверных замеров составляет около 90%. Это схоже с аналогичным показателем для уже применяющихся пылемеров. Многие из шахтёров заявили, что они предпочли бы использовать новый пылемер вместо уже применяемых, поскольку он встроен в лампу на каске, которую они обычно используют. Шахтёры высоко оценили возможность немедленно получать информацию о запылённости, обеспечиваемую новым прибором; а некоторые шахтёры научились использовать эту информацию так, чтобы свести к минимуму воздействие пыли.

Результаты испытаний в угольных шахтах показали, что точность измерений нового пылемера (относительное стандартное отклонение RSD) составляет 0,078. В следующей публикации будет показано, что результаты измерений нового прибора соответствуют критериям стандарта MRE.

В дальнейшем (необходимо) изучить то, как шахтёры могут использовать результаты измерений нового прибора для уменьшения воздействия пыли. Будет проведено исследование для определения и регистрации того, как шахтёры используют информацию о воздействии пыли, получаемую от нового пылемера. Будут проведены опросы каждого их представителей ~50 профессий, соответствующих основным наиболее распространённым специальностям подземных рабочих. Лучшие методы использования показаний нового пылемера будут зафиксированы, опубликованы и разосланы (по предприятиям) угольной промышленности. Хотя собрана информация, показывающая, что результаты измерений нового прибора соответствуют требованиям стандарта MRE (как это требует законодательство США), но анализ этих измерений оказался более сложным, чем это ожидалось сначала. Это связано с тем, что при увеличении концентрации обнаружилась изменчивость, и потребовалось использовать более сложную статистическую (математическую) модель, по сравнению с той, которую планировали использовать сначала. Готовится новый отчёт, в котором будет сделано сравнение показаний нового пылемера со стандартами MRE и ISO.

Благодарности

Авторы благодарны за советы и поддержку, которые они получили от: *joint Health and Safety Committee of the Bituminous Coal Operators' Association*, руководитель Джо Ламоника (*Joe Lamonica*) и от профсоюза *United Mine Workers of America*, руководитель Деннис О'Дел (*Dennis O'Dell*). Также авторы благодарны MSHA за активную поддержку и участие в совместных исследованиях (закупка измерительных приборов для испытаний и для замеров запылённости на 180 рабочих местах в разных шахтах страны. Мы благодарны администрации шахт за проявленное терпение, и особенно признательны тем шахтёрам, которые выполняли тяжёлую работу для того, чтобы мы получили достоверную информацию (о работоспособности приборов). Мы благодарны Эриху Рупрехту (*Erich Rupprecht*), *Business Development Manager* и Дэну Данхаму (*Dan Dunham*), *PDM Project Manager* (компания *Thermo Electron Corp.*) за их плодотворную помощь. Наконец, мы благодарны сотрудникам Питтсбургской лаборатории Института Эрике Холл, Кэлвину Гарбовски, Шону Вэндерслис и Жанне Зиммер (*Erica E. Hall, Calvin D. Garbowski, Shawn E. Vanderslice u Jeanne A. Zimmer*) за их добросовестную помощь в области управления оборудованием как во время лабораторных измерений, так и во время замеров в шахтах.

Приложение А.

Подробная информация об измерениях концентрации пыли в шахтах с помощью нового пылемера PDM

округ MSHA № 9													
Дата	Специальность и код специальности MSHA												
	Оператор очистного комбайна 64	Слесарь 4	Оператор очистного комбайна 64	Shift foreman 49	Faceman 41	Faceman 41	Faceman 41	Faceman 41	Слесарь 4	Headgate 40	Dust sampler 414	Fixed return 61	Fixed return 61
2 ноября		2,51	1,87	1,37	0,73	0,62	1,72	1,68					
3 ноября	2,03	1,81	2,17	0,61	2,24	2,8		2,73		1,62			
4 ноября	0,87	1,75	0,47	0,57	1,32	1,24		0,976	1,74	1,48			
5 ноября	0,44	0,28			0,59			0,37	0,57		0,32	0,23	0,64
6 ноября	0,25		0,12			0,17			0,15		0,17		
*7 ноября	0,82				0,99	0,66					0,86		
8 ноября	0,92	0,48	0,8		0,91	1,35	0,77						
9 ноября		1,6	2,35		3,35	3,41	3,19	3,13					
10 ноября	2,42				2,68								
11 ноября			0,91		1,52	1,37	1,47						

* - не работали.

округ MSHA № 3											
Дата	Специальность и код специальности MSHA										
	Miner operator 36	Tube side bolter 48	Intake side bolter 19	Loader operator 43	Standard shuttle car 50	Off-standard shuttle car 73	Слесарь 4	Бригадир 430	Center bolter 46	Center bolt helper 47	
14 декабря	0,38	0,69	0,31	1,09	0,26	0,37	0,35	0,5	0,35	0,33	
15 декабря	0,55	0,49	0,54	0,41	0,28	0,33	0,32	0,93	0,6	0,46	
16 декабря	0,48	0,72	0,45	0,37	0,26	0,31	0,4		0,45	0,54	
17 декабря		0,37	0,31	0,35	0,35	0,33	0,36	0,4	0,92		
20 декабря	0,69		0,57	0,44	0,33	0,36	0,4	0,48	0,07		
21 декабря		0,32	0,39	0,27	0,24	0,3	0,19	0,72	0,87		
22 декабря	0,31	0,41	0,4	0,24	0,24	0,19	0,23	0,66	(*)		

* - циклон был разбит (Cyclone broken, but ran in office)

округ MSHA № 4									
Дата	Специальность и код специальности MSHA								
	Оператор очистного комбайна (head operator) 064	Оператор очистного комбайна (tail operator) 040	Слесарь 1 004	Слесарь 2 004	Jack setter 1 041	Jack setter 2 041	Подсобный рабочий 053	Бригадир 049	
4 января	0,84	0,66	0,66	0,55	0,97	0,72	0,7	0,79	
5 января	1,41	1,07		0,69	1,4	1,29	1,3		
6 января	1,52	1,53	0,57	0,8	1,58	1,69	1,07	1,2	
7 января	1,4	0,64	0,56	0,66	1,43	1,33	1,13	1,71	
10 января	1,47	1,53	1,36	0,85	1,54	1,51	1,27	1,63	
11 января	1,86	1,84	0,25	1,02	2,07	1,56	1,42	1,88	
12 января	0,85	0,75	0,59	0,13	1,01	0,97	0,96	0,77	
13 января	1,45	1,44	1,05	0,85	1,21	1,24	1,07	1,56	

округ MSHA № 11																	
Дата	Специальность и код специальности MSHA																
	Miner operator 36	Miner helper 35	Intake side bolter 12	Return side bolter 14	Ram car 2 50	Ram car 3 50	Ram car 4 50	Бригадир 49	Scoop 54	Curtain 8	Brattice-man 32	Intake bolter (не в забое) 12	Return bolter (не в забое) 14	Guest	Belt-man	Подсобный рабочий	Motor-man
25 января	0,73	0,85	0,9	1,26	0,57	0,46	0,58	0,86	0,92	1,09		1,3		0,88		0,84	
26 января		1,23	0,65	0,9	1,17	0,98	1,16	1,23	0,67	0,58	0,66	0,54	0,52				
27 января	0,61	0,67	1,5	1,31	0,64	0,67	0,61	1,01	0,88	1,67	0,6	0,64	1,43	0,48			
28 января	0,58	0,95	0,51	0,43	0,7	0,6	0,58	0,39	0,7	0,41	0,64	0,22	0,21			0,46	
31 января	0,53	0,64	0,78	0,79	0,89	0,92	0,96	0,59	0,65	1,01		0,68	0,52		0,33		
1 февраля	0,5	0,78	1,06	1,05	0,32	0,27	0,36	0,66	0,45		0,36	0,56	0,69				
2 февраля	0,63	1,16	1,22	1,4	1,13	1,01		0,96		1,53		0,49					0,57
3 февраля	0,77	1,35	2,63	1,65	1,05	0,69	0,86	0,51	1	1,28							

округ MSHA № 2												
Дата	Специальность и код специальности MSHA											
	Standard shuttle car 50	Center bolter 46	Left return side bolter 14	Off-standard shuttle car 73	Utility man (не в забое) 53	Center bolter helper 47	Слесарь 4	Miner operator 36	Бригадир 49	Оператор машины-погрузчика 43	Right intake side bolter 12	Tubeman brattice 32
8 февраля	0,23	0,21	0,67	0,38	0,42	0,19		0,50	0,25	0,27	0,65	
9 февраля	0,14	0,19	0,55	0,21	0,19	0,17	0,19	0,41	0,31	0,18	1,74	0,86
10 февраля	0,42	0,4	0,78	0,25	0,48	0,24	0,31	0,42	0,31		0,89	0,73
11 февраля	0,18	0,25		0,23	0,29	0,41	0,30	0,40	0,45	0,27	0,51	0,64
14 февраля	0,22	0,20	0,79	0,16		0,24	0,21	0,43	0,29	0,22	0,66	0,55
15 февраля	0,15	0,24	1,63	0,29		0,21	0,19	0,38	0,52		0,87	0,58
16 февраля	0,24	0,26	0,82	0,42	0,04	0,26	0,34	0,39	0,42	0,63	0,93	0,96
17 февраля	0,17	0,18	1,06	0,28		0,32		0,54	0,51	0,41	0,79	1,17

округ MSHA № 10												
Дата	Специальность и код специальности MSHA											
	Right miner operator 36	Left miner operator 36	Right bolter opposite operator 12	Right bolter operator 14	Left bolter opposite operator 12	Left bolter operator 14	Shuttle car 1 50	Shuttle car 2 50	Shuttle car 3 50	Shuttle car 4 50	Бригадир 49	Слесарь 4
1 марта	0,86	1,63	0,76	0,55	1,33	1,76	0,82	0,74	0,66	0,63	0,6	0,59
2 марта	1,12	1,23	1,1	0,98	1,34	0,99	0,75	0,75	0,72	0,67	0,69	0,57
3 марта	1,07	1,73	1,71	0,6	2,48	2,46	0,77	0,83	0,7	0,78	0,56	
4 марта	0,68	1,58	0,62	0,6	1,57	32,45	0,85	0,97	0,79	0,86	0,52	1,35
5 марта	0,31	1,62	0,59	1,29	1,5	1,32	0,68	0,8		0,76	1,04	
7 марта		1,31	0,32	1,08		2,09	0,77	0,78	0,77	0,66	0,62	0,88
8 марта		1,64	0,73	0,92		1,32	0,74	0,89		0,8	0,78	0,89
9 марта	1,96	1,96	0,84	1		1,55	1,03	1,08	0,95	0,87	0,7	1,08
10 марта	0,67	1,64	0,7	*12,12		*6,32	0,75		0,76		0,53	1,11

* - Data valid, voided for cause.

округ MSHA № 6												
Дата	Специальность и код специальности MSHA											
	Roof bolter operator 12	Left miner operator 36	Shuttle car 50	Электрик 2	Left bolter operator 14	Right miner operator 36	Shuttle car 50	Бригадир 49	Left bolter 12	Shuttle car 50	Right miner operator 36	
15 марта	1,57	1,53	0,66	0,29	1,9	1,08	0,26	0,82	2	0,23		
16 марта	1,22	1,7	0,9	1,47	1,65		0,56	1,75	1,7	0,52	0,98	
17 марта	1,14	1,6		0,52	1,68		0,34	0,71		0,33	1,16	

округ MSHA № 5												
Дата	Специальность*											
	#1 Bridge	Left bolter/right side	Слесарь	#2 Bridge	Right bolter/left side	MSHA	Scoop	Right bolter/right side	#3 Bridge	Бригадир	Left bolter/left side	Miner operator
29 марта	1,42	1,25	0,63	0,58	1,19	1,31	NS	1,02	1,38	0,85	1,04	5,84
30 марта	0,34	1,62	1,48	0,87	3,43	NS	3,52	3,01	1,61	2,18	1,26	1,63
31 марта	0,32	0,72		0,5	1,17	NS	1,34	0,98	0,7	1,01	0,54	0,84

NS – отбор проб не проводился; * - коды специальностей MSHA отсутствуют.

округ MSHA № 8														
Дата	Специальность и код специальности MSHA													
	Right miner operator 36	Left miner operator 36	Right intake side bolter 12	Right return side bolter 14	Left intake side bolter 12	Left return side bolter 14	Coal hauler 67 50	Coal hauler 69 50	Бригадир 49	Utility 53	Mechanic 4	Mechanic 4	Safety	Coal hauler 67 50
19 апреля	NS		1,61		0,95	2,92	1,64	1,6	1	1,19	1,37	1,05	0,72	1,6
20 апр.	NS	1,46	1,75	2,72	1,58	2,52	1,08	1,09	1,68	0,96	0,5	0,54	0,69	1,27
21 апр.	0,42	4,24	2,19	3,34	1,15	2,84	1,74	1,74	1,46	1,08	0,74	0,83	NS	NS

NS – отбор проб не проводился.

округ MSHA № 7										
Дата	Специальность и код специальности MSHA									
	Miner operator 36	Pinner operator 12	Standard shuttle car 50	Off-standard shuttle car 73	Электрик 2	Scoop 54	Бригадир 49	NIOSH 1	NIOSH 2	MSHA
17 мая	0,35	0,24	0,29	0,24	0,34	0,23	0,17	0,47		
18 мая	1,27	0,32	0,3		0,58		0,25	0,29	0,963	0,7
19 мая	1,01	0,6	0,26		0,28	2,67	0,27			

31 марта	124	2,165				0,753		1,651				0,703	1,814				23	4,03	3,03	
	127	2,287	2,184	0,094	0,043	0,804	228	1,763	1,722	0,062	0,036	2,377	0,632	1,631	1,786	0,144	0,081	24	4,40	3,15
	130	2,101				0,799		1,752				0,742	1,914				25	3,97	2,68	
Шахта Air Quality mine, округ MSHA № 8																				
19 апреля	111	3,332				1,312		3,066				1,164	3,200				1	4,04	4,86	
	114	3,188	3,241	0,079	0,024	1,246	214	2,912	3,012	0,087	0,029	4,157	1,149	3,159	3,179	0,021	0,006	2	3,71	4,63
	126	3,203				1,309		3,059				1,156	3,178				3	3,52	4,75	
20 апреля	111	4,549				1,114		4,253				0,949	4,263				4	3,89	3,90	
	114	4,492	4,495	0,053	0,012	1,100	131	4,200	4,210	0,039	0,009	5,810	0,991	4,451	4,276	0,169	0,039	5	4,14	3,70
	126	4,443				1,094		4,177				0,916	4,115				6	3,56	3,49	
21 апреля	111	6,881				1,274		6,372				1,075	6,325				7	4,55	3,52	
	114	6,779	6,748	0,151	0,022	1,218	100	6,092	6,095	0,275	0,045	8,411	1,124	6,614	6,525	0,174	0,027	8	3,95	3,46
	126	6,584				1,164		5,822				1,128	6,637				9	3,90	3,63	
Шахта Panther mine, округ MSHA № 7																				
17 мая	111	4,269				1,122		3,320				1,138	3,961				7	4,32	2,47	
	114	4,218	4,274	0,058	0,014	1,151	169	3,405	3,409	0,092	0,027	4,705	1,129	3,930	3,909	0,065	0,017	8	4,36	2,86
	126	4,334				1,184		3,503				1,102	3,836				9			
18 мая	111	6,529				1,399		5,032				1,437	6,081				10	4,35	2,89	
	114	6,342	6,425	0,095	0,015	1,437	139	5,169	5,199	0,184	0,035	7,175	1,344	5,688	5,863	0,200	0,034	11	4,27	2,91
	126	6,405				1,500		5,396				1,375	5,819				12	4,52	2,29	
19 мая	111	2,594				0,741		2,047				0,709	2,304				13	5,91	3,02	
	114	2,566	2,565	0,029	0,011	0,719	181	1,986	2,044	0,057	0,028	2,821	0,699	2,272	2,277	0,025	0,011	14		
	126	2,536				0,760		2,099				0,694	2,255				15	6,25	2,38	

PF – отказ насоса; FL – файл результатов измерений, созданный PDM, содержит постоянные значения; NF – фильтр не был установлен.

Приложение С.

Анализ причин негативных результатов измерения концентрации респираторной пыли в угольных шахтах в период 1995-2004г

В таблице ниже приводится информация о причинах, по которым не удалось сделать достоверные замеры концентрации респираторной пыли в угольных шахтах. В числе таких причин указаны и те, которые не имеют отношения к механическим неисправностям пробоотборного оборудования. Приводится информация и о тех замерах, которые делали инспектора, и о тех, которые делали работодатели. Использование нового пылемера PDM могло бы заметно уменьшить число случаев, в которых не удалось сделать замеры. Причины неудачных замеров, которые могли бы быть выполнены с помощью нового пылемера успешнее, связаны с: документированием результатов измерений, учётом времени измерений, и в некоторых случаях – с взвешиванием отобранных проб пыли. Новый пылемер выполняет измерение, и для результатов измерений создаёт файл с уникальной информацией о дате, времени (замера), и различными параметрами проведения измерений, что исключает многие из выполняемых сейчас действий, относящихся к регистрации результатов. Кроме того, новый пылемер запрограммирован на включение и выключение в определённые моменты времени, что предотвращает выполнение слишком длительных замеров. Устройство определяет значения всей массы пыли, уловленной к концу смены (EOS), и соответствующую среднесменную концентрацию пыли. Это делает ненужным перевозку фильтров с уловленной пылью в лабораторию для взвешивания и анализа; хранение этих фильтров, и отчасти устраняет необходимость их лабораторного анализа. Причины неудачного проведения измерений, которые могли бы быть устранены при использовании нового пылемера, отмечены в примечании к таблице внизу. Отметим, что некоторые из причин относятся лишь к замерам, выполненным инспекторами, или к замерам, выполненным работодателем.

(Источник: MSHA [2005] ³² .)	Замеры выполнены	
	инспекторами	работодателями
Общее число замеров	381 335	487 713
Получены достоверные результаты	357 936 (93,9%)	430 710 (88,3%)
Не удалось получить достоверные результаты	23 399 (6,1%)	57 003 (11,7%)
Причины неудач при проведении измерений		
Фальсифицированные замеры (<i>Abnormal tamper-resistant</i>)	не применимо	14
На фильтра с уловленной пылью обнаружено белое пятно в центре, потенциально фальсифицированный результат измерений (<i>Abnormal white center</i>)	не применимо	6
*Разбилась (кассета с фильтром или насос) (<i>Broken</i>)	204	1452
*Кассета не соответствует сопроводительной информации на карточке (<i>Cassette did not match card</i>)	63	897
*Кассета с фильтром не получена лабораторией (<i>Cassette not received</i>)	2	45
*Фильтр с уловленной пылью загрязнён (<i>Contaminated</i>)	1 166	3 023
*Указана дата отправки кассеты – раньше чем выполнен замер (<i>Dated before notice</i>)	не применимо	1 459
Указано место замера, где работа не проводится (<i>Designated area not in producing status</i>)	3	2 123
Указано место работы, где работа не проводится (<i>Designated work position not in producing status</i>)	2	919
*Фильтр был выброшен как слишком старый (<i>Discarded sample - too old</i>)	не применимо	2 487
*Кассета с фильтром не имела сопроводительной информации (<i>Dust data card not received</i>)	3	5
*Слишком длительный замер (<i>Excess sample</i>)	1	17 431
<i>Inspector void; rain</i>	264	не применимо
Недостаточное количество пыли на пробоотборном фильтре (<i>Insufficient dust observed</i>)	189	867
Недостаточное увеличение массы пробоотборного фильтра в течение замера (<i>Insufficient weight gain</i>)	27	3 966
Указан неправильный сертификационный номер (<i>Invalid certification number</i>)	76	610
*Неправильно указан начальный вес фильтра (<i>Invalid initial weight</i>)	108	320
Неправильно указан код специальности шахтёра (<i>Invalid occupation code</i>)	4	не применимо
*Неправильно указана или не указана дата замера (<i>Invalid or missing date</i>)	2	2
*Указано некорректное время замера, или не указано вообще (<i>Invalid or missing time</i>)	5 407	4 477
<i>Invalid Part 90 miner ident</i>	не применимо	1
<i>Invalid production</i>	11 359	9 923
Неправильно указан тип замера (<i>Invalid sample type</i>)	547	1 410
Неправильно указано место работы (<i>Invalid work position</i>)	21	1
<i>Invalid work shift</i>	2 473	20
*Неисправность пробоотборного насоса (<i>Malfunctioning pump</i>)	1 115	15
Указана шахта, которая не работает (<i>Mine not in producing status</i>)	2	не применимо
Указаны использовавшиеся горные машины, которые не работали (<i>Mining machine unit not in producing status</i>)	не применимо	1 101
Использовалось не сертифицированное измерительное оборудование (<i>Nonapproved equipment</i>)	не применимо	5
<i>Occupation code-meth mining mismatch</i>	4	не применимо
<i>Operator void; equipment</i>	10	2 083
<i>Operator void; location</i>	2	492
<i>Operator void; miscellaneous</i>	36	116
<i>Operator void; production</i>	30	470
<i>Operator void; rain</i>	6	15
<i>Operator void; time</i>	13	385
*На фильтре имелись крупные частицы не-респирабельного размера (<i>Oversize particles</i>)	263	390
<i>Part 90 miner not available</i>	не применимо	8
*Некорректно указана дата замера (<i>Predated</i>)	4	88
<i>Quartz laboratory void</i>	7	46
<i>Sample not voided</i>	357 963	430 710
* <i>Sample received while in hold</i>	не применимо	191
*Некорректный интервал времени (проведения измерений) (<i>Unacceptable timeframe</i>)	не применимо	4
Работа проводилась в непопозженном месте (<i>Unauthorized work position</i>)	6	137
Всего	381 355	487 713
Число неудачных замеров, которые могли бы быть успешно выполнены при использовании нового пылемера	8 338	32 286
Доля неудачных замеров, которые могли бы быть успешно выполнены при использовании нового пылемера	35,6%	56,6%

* - использование нового пылемера PDM позволило бы успешно сделать эти замеры.

Литература

- ²² **David L. Bartley** [2001]. Definition and assessment of sampling and analytical accuracy. *The Annals of Occupational Hygiene* 45(5):357–364. DOI: 10.1093/annhyg/45.5.357 <http://annhyg.oxfordjournals.org/content/45/5.toc> ISSN: 0003-4878
- ⁸ **David L. Bartley, Chih-Chieh Chen, Ruiguang Song & Thomas J. Fischbach** [1994]. Respirable aerosol sampler performance testing. *American Industrial Hygiene Association Journal* 55(11):1036–1046. DOI: 10.1080/15428119491018303 <http://www.tandfonline.com/toc/aiha20/55/11> ISSN: 1542-8117
- ³⁰ **David L. Bartley, Shulman SA, Schlecht PC** [2003]. Chapter P – Measurement uncertainty and NIOSH method accuracy range. In: Schlecht PC, O'Connor PF, eds. *NIOSH manual of analytical methods (NMAM)*. 4th ed. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 2003–154, pp. 208–228. [<http://www.cdc.gov/niosh/nmam/pdfs/chapter-p.pdf>].
- ²³ **Marvin W. Blachman & Morton Lippmann** [1974]. Performance characteristics of the multicyclone aerosol sampler. *American Industrial Hygiene Association Journal* 35(6):311–326. DOI: 10.1080/0002889748507040 <http://www.tandfonline.com/toc/aiha20/35/6> ISSN: 1542-8117
- ¹⁹ **William C. Hinds** [1982]. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- ⁶ **ISO** [1995]. *Air quality: particle size fraction definitions for health-related sampling*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization. ISO 7708:1995.
- ^{13 16 20 21} **Eugene R. Kennedy, Fischbach J. Thomas, Song Ruiguang, Eller M. Peter, Shulman A. Shulman** [1995]. *Guidelines for air sampling and analytical method development and evaluation*. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 95–117. <http://www.cdc.gov/niosh/docs/95-117/>
- ^{2 28} **Fred N. Kissell, Sacks HK** [2002]. Inaccuracy of area sampling for measuring the dust exposure of mining machine operators in coal mines. *Min Eng* 54(2):33–39.
- ^{17 29} **Jon Kogut, Thomas F. Tomb, Paul S. Parobeck, Andrew J. Gero & Karen L. Suppers** [1997]. Measurement precision with the coal mine dust personal sampler. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 12(12):999–1006. DOI: 10.1080/1047322X.1997.10390640 <http://www.tandfonline.com/toc/uaoh20/12/12> ISSN 1047-322X
- ^{15 27} **Virgil A. Marple & Kenneth L. Rubow** [1983]. An aerosol chamber for instrument evaluation and calibration. *American Industrial Hygiene Association Journal* 44(5):361–367. DOI: 10.1080/15298668391404978 <http://www.tandfonline.com/toc/aiha20/44/5> ISSN: 1542-8117
- ⁹ **Maynard AD, Kenny LC** [1995]. Performance assessment of three personal cyclone models, using an aerodynamic particle sizer. *Journal of Aerosol Science* 26(4):671–684. DOI: 10.1016/0021-8502(94)00131-H <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00218502/26/4> ISSN: 0021-8502
- ⁵ **MSHA** [2003]. Statement of David D. Lauriski, assistant Secretary of Labor for mine safety and health, before the subcommittee on labor, health and human services, and education, committee on appropriations, United States Senate, July 31, 2003, p. 3. [<http://www.msha.gov/media/congress/2003/07312003.pdf>]. Date accessed: May 2006.
- ³² **MSHA** [2005]. MSHA standardized information system (Teradata), coal dust data. Date accessed: December 5, 2005. Arlington, VA: U.S. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration.

- ¹⁰ **Harvey Patashnick & Erich G. Rupprecht** [1991]. Continuous PM-10 measurements using the tapered-element oscillating microbalance. *Journal of the Air & Waste Management Association* 41(8):1079–1083. DOI: 10.1080/10473289.1991.10466903 <http://www.tandfonline.com/toc/uawm18/41/8> ISSN: 1047-3289
- ³¹ **Thomas M. Peters & Jon C. Volkwein** [2003]. Analysis of sampling line bias on respirable mass measurement. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 18(6):458–465. DOI: 10.1080/10473220301418 <http://www.tandfonline.com/toc/uaoh20/18/6> ISSN: 1047-322X
- ¹⁸ **Kenneth L. Rubow, Virgil A. Marple, John Olin & Michael A. McCawley** [1987]. A personal cascade impactor: design, evaluation and calibration. *American Industrial Hygiene Association Journal* 48(6):532–538. DOI: 10.1080/15298668791385174 <http://www.tandfonline.com/toc/aiha20/48/6> ISSN: 1542-8117
- ¹¹ **Rupprecht and Patashnick Co.** [2004]. Operating manual, TEOM series 3700/3700 personal dust monitor, revision A, September 2004, R&P part number 42–009904. Albany, NY: Rupprecht and Patashnick Co., Inc. <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/PDM3700>
- ⁷ **Sidney C. Soderholm** [1989]. Proposed international conventions for particle size-selective sampling. *The Annals of Occupational Hygiene* 33(3):301–320. DOI: 10.1093/annhyg/33.3.301 <http://annhyg.oxfordjournals.org/content/33/3.toc> ISSN: 0003-4878
- ³ **U.S. Department of Labor** [1996]. Report of the Secretary of Labor’s advisory committee on the elimination of pneumoconiosis among coal mine workers. Recommendation Nos. 8 and 17. Arlington, VA: U.S. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration. <http://findit.library.gwu.edu/item/9232566>
<http://permanent.access.gpo.gov/lps21683/1996Dust%20AdvisoryReport.pdf>
- ²⁴ **Volkwein JC, Thimons, ED** [2001]. New tools to monitor personal exposure to respirable coal mine dust. In: *Proceedings of the Seventh International Mine Ventilation Congress (Krakow, Poland, June 17–21, 2001)*, pp. 143–150.
- ^{4 14 25 26} **Volkwein JC, Vinson RP, McWilliams LJ, Tuchman DP, Mischler SE** [2004]. Performance of a new personal respirable dust monitor for mine use. Pittsburgh, PA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 2004–151, RI 9663.
<http://www.cdc.gov/niosh/mining/works/cover-sheet1719.html>
- ¹ **Williams KL, Timko RJ** [1984]. Performance evaluation of a real-time aerosol monitor. Pittsburgh, PA: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, IC 8968. NTIS No. PB 84–199710.
- ¹² **Williams KL, Vinson RP** [1986]. Evaluation of the TEOM dust monitor. Pittsburgh, PA: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, IC 9119. NTIS No. PB 87–18297

**Delivering on the Nation’s Promise:
Safety and health at work for all people through research and prevention
For information about occupational safety and health topics contact NIOSH at:**

1–800–35–NIOSH (1–800–356–4674)

Fax: 513–533–8573

E-mail: pubstaft@cdc.gov

www.cdc.gov/niosh

**SAFER • HEALTHIER • PEOPLE™
[DHHS \(NIOSH\) Publication No. 2006–14](#)**