УДК 504.3.054

Разработка концепции инновационной лабораторной установки для исследования пылящих поверхностей

А.В.ИВАНОВ ✉, Ю.Д.СМИРНОВ, С.А.ЧУПИН

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Иванов А.В. Разработка концепции инновационной лабораторной установки для исследования пылящих поверхностей / А.В.Иванов, Ю.Д.Смирнов, С.А.Чупин // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 757-766. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.15

Аннотация. В настоящее время определение мощности выброса твердых взвешенных веществ с единицы площади поверхности техногенного массива при различных параметрах ветрового потока описано недостаточно. Анализ мирового опыта исследователей показал, что существующие лабораторные установки обладают различными конструктивными особенностями, не позволяющими корректно определить массу взметаемой и переносимой пыли. На основании результатов анализа разработана концепция инновационной лабораторной установки для исследования пылящих поверхностей. Она учитывает влияние аэродинамических теней, детурбулизацию искусственно создаваемого потока воздуха, возможность регулирования не только скоростного режима потока, но и создания разряжения или возмущения в области размещения образцов, а также формирования определенного угла атаки ветрового потока относительно поверхности. В концепции заложена возможность определения объемов выброса пыли по значениям потерянных масс пыли в образце и по значениям концентраций пыли в выходящем потоке. Проведен расчет основных базовых элементов установки с применением программного пакета ANSYS FLUENT. Разработана и рассчитана модель и компоновка аэродинамической трубы, определены основные геометрические параметры и функциональные элементы для возможности использования в научной работе. Для практического использования эмпирического показателя шероховатости подстилающей поверхности рекомендованы его значения в широких пределах – от нуля для водной поверхности до 0,44 для крупных городов с высокими зданиями и небоскребами.

Ключевые слова: пылящая поверхность; пыль; пылеподавление; бункер; аэродинамическая труба; скорость ветра; геоэкология; безопасность жизнедеятельности

Введение. Проблема загрязнения атмосферного воздуха твердыми взвешенными веществами является крайне актуальной в горнодобывающей, горноперерабатывающей, строительной и многих других отраслях, где используются сыпучие среды. Существующие средства измерений концентраций пыли позволяют провести анализ текущего состояния воздушной среды, отдельные виды измерительного оборудования производят оперативную обработку данных с получением графиков изменения концентраций и разделения пыли на фракции. Тем не менее открытым остается вопрос определения масс сдуваемой и переносимой пыли для проведения детальной инвентаризации источников загрязнения атмосферного воздуха и проектных расчетов негативного воздействия производственных объектов. Существующие методики расчета объема выброса загрязняющих веществ основаны на учете ряда коэффициентов и часто дают существенное расхождение с данными мониторинга.

Реальная масса переноса пыли от ее источника в рассматриваемую точку воздушного пространства или поверхности зависит от ряда факторов внешней среды. К основным из них можно отнести: режим действия ветрового потока, влажность воздуха, гранулометрический и химический состав, гигроскопичность пыли, структуру и форму пылевых частиц, температуру воздуха и пылевых частиц и др. Корректные расчетные методики определения реальных величин масс пылепереноса в настоящее время не разрабатываются из-за высокой сложности учета всех условий и больших значений погрешностей в расчете.

В Горном университете неоднократно рассматривался вопрос пылевого загрязнения атмосферы в районах размещения предприятий минерально-сырьевого комплекса [16, 19] и поднималась проблема определения объемов пылепереноса от источника к расчетной точке [6, 11]. Работа

по созданию комплексов, позволяющих производить лабораторную оценку сред под ветровой нагрузкой, велась специалистами Горного университета [8, 12, 13] и специалистами других организаций, но основной проблемой используемых установок являлось отсутствие возможности создания условий, близких к атмосферным [2, 28]. Разработанная концепция инновационной лабораторной установки для исследования пылящих поверхностей с учетом влияния аэродинамических теней, детурбулизации искусственно создаваемого потока воздуха, возможности регулирования не только скоростного режима потока, создания разряжения или возмущения в области размещения образцов, а также формирования определенного угла атаки ветрового потока относительно поверхности представляет важную научную и практическую задачу [3, 4, 25].

Цель исследований – разработка концепции инновационной лабораторной установки для исследования пылящих поверхностей, которая может быть эффективно применена для решения практических задач определения выноса пыли с техногенных объектов. Это позволяет точно фиксировать негативные воздействия пылящих объектов, а также эффективно предотвращать их.

Задача исследований – моделирование поля скоростей воздушного потока в трубе с применением различных конструктивных решений с учетом условий лабораторного помещения и широкого спектра исследуемых условий пылевыведения.

Методология. Проект реализован на основе лабораторной, экспериментальной и фондовой базы Научно-образовательного центра Горного университета с использованием оборудования Центра коллективного пользования Горного университета.

Использовалась лабораторная установка, включающая:

- Бункер пылеподавления БПП 001 – герметичное разборное устройство с прозрачными стенками для наблюдения процесса взметывания пыли, герметизируемыми отверстиями для подключения измерительного оборудования и для установки нагнетателей.
- Нагнетатель воздуха УЕТМ ЕП-2 для создания направленного потока воздуха в пространстве бункера и аэродинамического воздействия на испытуемый образец.
- Комбинированный полуавтоматический пылемер DustTrak 8533 для измерения массовой концентрации пыли фракций PM1.0, PM2.5 и PM10 лазерно-нефелометрическим методом.
- Метеометр МЭС-200А для оценки микроклиматических параметров среды.

Моделирование воздушного потока проводилось методом конечных элементов в среде Ansys Fluent. Ansys Fluent – модуль Ansys для CFD анализа, предназначенный для моделирования гидродинамических процессов (течение жидкостей и газов, турбулентность, горение, теплообмены и др.).

В работе были учтены действующие правовые акты, регламентирующие сферу экологической безопасности, а также охраны труда работников и жителей населенных пунктов в зоне влияния загрязняющих объектов.

Обсуждение. Рассматривается установка исследования пылящих поверхностей, разработанная в Шаньдунском университете науки и технологий и Ляонинском техническом университете (рис.1).

Рис.1. Установка испытания пылящих сред Шаньдунского университета науки и технологий и Ляонинского технического университета (Китай) [9, 20, 26]

Лабораторная установка – бункер пылеподавления БПП 001, обеспечивающий выполнение задач определения эффективности средств пылеподавления, используется в Горном университете (рис.2). Аэродинамические установки всегда допускают расхождение, но низкие ветровые нагрузки это расхождение увеличивают, что было подтверждено исследованиями МК-130.2020.5 (Горный университет). Несмотря на возможное применение этих комплексов для определения эффективности разрабатываемых средств пылеподавления, они не позволяют создавать условия, подобные атмосферным в связи с конструктивными аэродинамическими особенностями [21, 22, 24]. Определение масс пылепереноса возможно только за счет фиксирования концентраций на выходе из установки, что предъявляет повышенные требования к аэродинамической проработке подобных стендов.

Существенное влияние на поля скоростей оказывают переменность сечений проточной части, наличие зон аэродинамических теней, турбулизация, создаваемая изгибами и поворотами проточной части, стенки проточной части. Бункер пылеподавления выполнен в виде параллелепипеда, что подразумевает наличие двугранных и трехгранных острых углов внутри установки. Углы являются зонами аэродинамических теней, наличие которых может привести к частичному накоплению сдуваемого испытуемого материала, а затем давать вторичную концентрацию в ходе эксперимента.

Испытуемая площадка находится на дне бункера, отсутствует возможность исключения влияния поверхности. В натуральных условиях возможно влияние поверхности земли на скорость ветра, но в разных условиях поверхностной шероховатости оно будет разным. В лабораторной установке должна существовать возможность подъема испытуемой площадки над поверхностью для минимизации ее влияния. Бункер не имеет отверстия для выхода воздуха. Тем не менее, установка не является герметичной, вывод воздуха происходит через войлочные уплотнители между разборными элементами установки. Площадь сечения войлочных уплотнителей велика и скорость выхода воздуха через них крайне мала, но не исключена возможность процесса фильтрации аэрозоля в войлоке.

Размещение образцов на днище бункера не позволяет определять конечную массу образцов, что фактически не дает возможность определять эффективность средств закрепления лишь по значениям концентраций в воздухе бункера. Использование изолированной установки в любом случае подразумевает наличие влияния стенок на распространение воздуха. Исключение влияния достигается созданием открытой рабочей части. С другой стороны, создание открытой рабочей части приведет к потере части пыли при распылении и невозможности определения эффективности средств закрепления по концентрации.

Искусственно создаваемый поток воздуха не всегда соответствует реальному ветру по степени турбулизации, особенно если поток создается электровентилятором, что вызывает необходимость использования детурбулизирующих устройств. В рамках нормативной базы России на этапе проектирования расчет полей концентраций может быть произведен только на основании методики МРР-2017, которая оперирует основной характеристикой – интенсивностью выброса источника, рассчитываемой различными отраслевыми методиками. Определение интенсивности выбросов экспериментальным путем является ключевой задачей, которую должна решать новая аэродинамическая установка.

С учетом исследований Горного университета, Шаньдунского университета науки и технологий и Ляонинского технического университета были сформулированы требования к новой аэродинамической установке:

- использование в качестве проточной части трубы постоянного сечения аэродинамически правильной формы;

Рис.2. Бункер пылеподавления БПП 001 (Горный университет)

- незамкнутый контур трубы для возможности исключения подтягивания пыли в рабочую часть повторно;
- возможность оценки массы сдуваемой пыли, а также концентраций сдуваемой пыли на выходе;
- испытание образцов в открытой рабочей части для возможности исключения влияния стенок на поле скоростей воздуха;
- наличие устройств детурбулизации искусственно создаваемого потока воздуха;
- конструктивная возможность моделирования разных вариантов характера движения ветрового потока за счет разряжения, подпора, с формированием зоны возмущения и т.д.

Одним из наиболее аэродинамически правильных сечений является круглое, но для обеспечения подобия сечение должно обладать как можно большим диаметром. Зачастую вентиляторы и нагнетатели имеют меньшее сечение и используют конусообразный раструб на выходе. В условиях проведения экспериментов в лабораториях университета существуют ограничения по габаритам устройства, поэтому выбрано рассматриваемое сечение трубы из стандартного ряда – 500 мм. Численное моделирование потоков воздуха методом конечных элементов позволяет минимизировать экспериментальные исследования. В работе [23] авторы исследовали влияние ветровой нагрузки на движущиеся объекты, в работе [17] – образование ряби на песке под воздействием потока воздуха, моделирование интенсивности распространения пыли в шахте при различных скоростях потока проводилось в работе [10].

На первом этапе проводилось исследование влияния конусообразного раструба на распределение скоростей воздуха и турбулизацию. Рассмотрен переход из подающего патрубка диаметром 100 мм в трубу диаметром 500 мм, оцениваемый участок трубы длиной 5 диаметров (2500 мм) (рис.3). Начальные и граничные условия: приток воздуха через патрубок диаметром 100 мм со скоростью 93,75 м/с (из расчета снижения средней скорости до 15 м/с в трубе диаметром 500 мм), температура воздуха 20 °С, относительная влажность воздуха 45 %, коэффициент шероховатости всех поверхностей 0,2.

Из рис.3, а видно, что при соосном размещении подающего патрубка и трубы после конусообразного раструба происходит успокоение потока лишь на расстоянии около четырех диаметров, при этом в выходном сечении наблюдается относительно равномерное поле скоростей. Расчет, результаты которого представлены на рис.3, б, направлен на определение возможности использования поворота 180° для увеличения длины патрубка малого сечения при уменьшении габаритов установки. Увеличение длины патрубка малого сечения необходимо для обеспечения лучшего выравнивания потока перед входом в конус. Расчет показал, что даже при удлинении наличие поворота не обеспечивает выравнивания и происходит смещение потока к одной из стенок. Расчет моделей с меньшими длинами трубы и углами конусообразного раструба показал аналогичный результат. Выбрано соосное размещение подающего патрубка и трубы, но с избавлением от конусообразного раструба в установке, т.е. использования постоянного сечения трубы.

Выравнивание потока в случае применения соосного размещения подающего патрубка и трубы достигается на расстоянии порядка пяти диаметров, что подтверждает известное правило гидравлики о расстоянии уравнивания поля скоростей. Следующим

Рис.3. Оценка поля скоростей в трубе при использовании нагнетателя малого сечения и конусообразного раструба при прямой подаче воздуха (а) и при подаче воздуха через поворот 180° (б)

этапом работ являлось модельное исследование трубы постоянного сечения (500 мм) с применением воздухоудовки (вентилятора) соответствующего сечения. Опираясь на опыт создания аэродинамических труб для других отраслей, было решено рассмотреть не только вариант работы воздухоудовки на приток (рис.4, а), но и на вытяжку воздуха (рис.4, б). Начальные и граничные условия: приток и вытяжка воздуха

с помощью имитированного осевого вентилятора со средней по сечению скоростью 15 м/с, температура воздуха 20 °С, относительная влажность воздуха 45 %, коэффициент шероховатости всех поверхностей 0,2.

Рис.4. Оценка поля скоростей в трубе постоянного сечения при работе воздухоудовки на приток воздуха в трубу (а) и на вытяжку (б)

По результатам моделирования можно видеть, что поле скоростей при работе вентилятора на приток воздуха стабилизируется хуже, чем при работе вентилятора на вытяжку, поэтому второй вариант является более предпочтительным. Но использование двух вентиляторов позволит обеспечить возможность моделирования условий возмущения или разряжения в воздухе, что дает дополнительные возможности при проведении лабораторных исследований пылящих поверхностей в установке. Применение одного вентилятора в трубе с замкнутой циркуляцией воздуха подобный эффект обеспечить не позволит. Замкнутая циркуляция при работе с пылящими средами всегда подразумевает вторичный подсос пыли и невозможность минимизации фоновой концентрации в подаваемом воздухе, поэтому предпочтительным является использование незамкнутой конструкции.

При моделировании условий внешней среды наиболее важным является поле скоростей воздуха, формируемых в области размещения испытуемых образцов. Непосредственно в трубе диаметром 500 мм не достигается поле скоростей, близкое к естественному, это вызвано малым диаметром трубы, который обусловлен снижением габаритных размеров устройства для его размещения в лабораторном помещении. Это вызывает необходимость в рабочей части трубы делать разрыв, как это делается в аэродинамических трубах для испытания летной техники. На следующем этапе исследований проводилась оценка поля скоростей в открытой части аэродинамической трубы. В начале расчет проводился при условии вытяжки воздуха из трубы и свободной рабочей части (рис.5, а) и нагнетании воздуха и свободной рабочей части (рис.5, б). При вытяжке воздуха видно, что на заданных начальных скоростях происходит концентрирование скоростей выхода из рабочей части и скорость значительно возрастает лишь на расстоянии от 0,1 диаметра от входа, что не позволяет получить желаемого поля в рабочей части, в то время как при нагнетании воздуха при выходе в рабочую часть формируется факел с практически полным сохранением параметров потока на расстоянии до двух диаметров. При использовании приточного вентилятора, выходного патрубка, замкнутой рабочей части, столка для размещения образцов (рис.5, в) можно наблюдать формирование возмущений в рабочей части, при этом аналогичная конструкция, но с работой вентилятора на вытяжку (рис.5, г), показывает равномерность поля скоростей. При наличии двух вентиляторов – приточного и вытяжного (рис.5, д) поле скоростей предельно близко к полю при наличии только вытяжного вентилятора. Начальные и граничные условия: вытяжка воздуха с помощью имитированного осевого вентилятора со средней по сечению скоростью 15 м/с, температура воздуха 20 °С, относительная влажность воздуха 45 %, коэффициент шероховатости всех поверхностей 0,2. Открытая рабочая часть квадратная в сечении с размером стороны 2500 мм.

Таким образом, было решено остановиться на компоновке с вытяжным вентилятором, но с сохранением приточного вентилятора создания подпора и зоны возмущения. Результатом работы стала инновационная лабораторная установка для исследования пылящих поверхностей (рис.6). Перед началом использования лабораторной установки выбирают одну из двух конфигураций аэродинамической трубы – используют трубу с открытой частью в области размещения образцов (рис.6, а), если требуется имитация условий воздействия ветрового потока на открытой местности без влияния стенок трубы, либо патрубок подачи воздуха 5 и патрубок вытяжки воздуха 12 герметично стыкуют и формируют закрытую трубу (рис.6, б) с изолированным размещением образцов, при котором при работе не происходит потерь пылящего компонента, а оценку воздействия на исследуемые образцы можно проводить по значениям концентраций.

Рис.5. Оценка поля скоростей в трубе с разрывом в рабочей зоне при подаче воздуха со скоростью 15 м/с при использовании: а – вытяжной воздухоудовки и свободной рабочей части; б – приточной воздухоудовки и свободной рабочей части; в – приточной воздухоудовки и выходного патрубка в присутствии столика для размещения образцов; г – вытяжной воздухоудовки и входного патрубка в присутствии столика для размещения образцов; д – приточной и вытяжной воздухоудовки в присутствии столика для размещения образцов; е – шкала скоростей движения воздуха

Рис.6. Лабораторная установка – аэродинамическая труба для исследования пылящих поверхностей

1 – колесные опоры со стопором; 2 – съемный приточный вентилятор; 3 – детурбулизирующие решетки; 4 – метеометр; 5 – патрубок подачи воздуха; 6 – съемные регулируемые дефлекторы; 7 – герметизируемые прорези; 8 – столик для испытуемых образцов; 9 – весы; 10 – зажимы; 11 – пылемер; 12 – патрубок вытяжки воздуха; 13 – вытяжной вентилятор; 14 – заборное устройство измеряемой пыли; 15 – направляющие; 16 – рама; 17 – регулируемые опоры; 18 – заборное устройство фоновой пыли; 19 – измерительный щуп

Предварительным регулированием работы съемного приточного вентилятора 2 (или его удалением) и вытяжного вентилятора 13 осуществляется настройка аэродинамического режима – моделирование условий возмущения или разряжения в ветровом потоке и установление определенной скорости потока, а также определение других микроклиматических параметров метеометром 4 через измерительный щуп 19. При этом неравномерность в ближнем поле скоростей ветра съемного приточного вентилятора 2 (которой не обладает вытяжной вентилятор 13) компенсируется установленными за ним детурбулизирующими решетками 3, а съемными регулируемыми дефлекторами 6 может быть угол направления ветра относительно поверхности столика для испытания образцов 8.

Столик для испытания образцов 8, опирающийся на весы 9, регулируемые опоры 17 выставляется на необходимую высоту, при этом остается незагруженным и заблокированным зажимами 10. После настройки аэродинамического режима работа вентиляторов 2 и 13 приостанавливается. Зажимы 10 отсоединяются, весы 9 тарируются. На поверхность столика 8 укладывается образец испытуемого пылящего компонента, после чего взвешивается весами 9. Затем зажимами 10 столик 8 фиксируется неподвижно.

В случае использования конфигурации аэродинамической трубы для исследования пылящих поверхностей с открытой частью в области размещения образцов (рис.6, а) патрубок подачи воздуха 5

и патрубок вытяжки воздуха 12 фиксируются на заданном расстоянии колесными опорами со стопором 1. При использовании конфигурации аэродинамической трубы с изолированным размещением образцов (рис.6, б), когда патрубок подачи воздуха 5 и патрубок вытяжки воздуха 12 герметично стыкуют, столик для испытуемых образцов 8 на регулируемых опорах 17 задвигается внутрь трубы через герметизируемые прорези 7. Далее запускаются вентиляторы 2 и 13, либо один из них согласно выбранному аэродинамическому режиму.

В течение определенного времени экспозиции пылемером 11 измеряется фоновая концентрация пыли заборным устройством фоновой пыли 18 и концентрация пыли в потоке загрязненного воздуха заборным устройством измеряемой пыли 14. После прекращения работы вентиляторов 2 и 13 зажимы 10 отсоединяются и весами 9 измеряется масса образца испытуемого пылящего компонента после аэродинамического воздействия на него.

Сравнительная характеристика установки испытания пылящих сред разработки Шаньдунского университета науки и технологий и Ляонинского технического университета (Китай) и разработанной аэродинамической трубы для исследования пылящих поверхностей представлена в таблице.

Сравнительная характеристика установки испытания пылящих сред и аэродинамической трубы для исследования пылящих поверхностей

Установка испытания пылящих сред (Китай)	Аэродинамическая труба для исследования пылящих поверхностей
В качестве проточной части используется прямая труба непостоянного квадратного сечения с аэродинамическими тенями в двухгранных и трехгранных углах	В качестве проточной части используется прямая труба постоянного сечения аэродинамически правильной круглой формы.
Испытание образцов возможно только в закрытой трубе с изолированным от отгружающего воздуха размещением образцов с определением интенсивности пылевыведения только по потере масс	Испытание образцов возможно как в закрытой трубе с изолированным от отгружающего воздуха размещением образцов (определение интенсивности пылевыведения по потере масс и по концентрациям), так и с открытой рабочей частью в области размещения образцов для возможности исключения влияния стенок на поле скоростей воздуха (определение интенсивности пылевыведения по потере масс)
Отсутствуют устройства детурбулизации потока	Имеется детурбулизирующая решетка искусственно создаваемого потока воздуха
Отсутствуют устройства для варьирования угла направления ветра относительно испытуемой поверхности	Имеются съемные регулируемые дефлекторы для регулирования угла направления ветра относительно поверхности столика для испытания образцов
Отсутствует конструктивная возможность моделирования различных условий создания ветрового потока.	За счет применения съемного приточного вентилятора имеется возможность моделировать ветровой поток за счет разряжения, подпора, с формированием зоны возмущения и т.д.
Анализ масс образцов до и после аэродинамического воздействия возможен только с изъятием образцов из установки	Анализ масс образцов возможен сразу после испытания непосредственно в установке за счет размещения столика на весах с зажимами и герметизацией

Особого внимания заслуживает вопрос рассмотрения поля скоростей ветра над поверхностью. На течение воздуха в слое атмосферы до 500 м существенное влияние оказывают рельеф подстилающей поверхности и наличие застройки, которые рассматриваются на масштабах течений как условная шероховатость поверхности трения. По опытным данным о профиле скоростей ветра в приземном слое выведена логарифмическая закономерность (рис.7). На поверхности земли вследствие хорошо известного из гидро- и аэродинамики условия полного прилипания и нормальная, и обе тангенциальные составляющие скорости обращаются в ноль:

$$V_1 = V_0 \left(\frac{H_1}{H_0} \right)^k,$$

где V_1 – скорость ветра на заданной высоте, м/с; V_0 – скорость ветра на известной высоте, м/с; H_1 – заданная высота, м; H_0 – известная высота определения скорости ветра, м; k – эмпирический показатель шероховатости подстилающей поверхности, изменяется от нуля для водной поверхности до 0,44 для больших городов с высокими зданиями и небоскребами.

Рис. 7. Примеры влияния условной шероховатости поверхности местности на профиль скорости ветра

1 – город; 2 – пригород; 3 – ровная местность (за городом)

Отдельный вопрос вызывает принимаемое значение k . Во многих работах принимается $k = 0,143$, иногда рекомендуют принимать $k = 0,2$. В расчетных методиках США для различных мест используются значения от 0,2 до 0,26. При измерениях на различных высотах значения k достигают 0,34. В отдельных работах для Украины используется $k = 0,167$. Специалистами проектно-конструкторского технологического бюро «КОНКОРД» (Украина) предложены следующие значения: водная поверхность – $k = 0$; полностью открытый ландшафт с мягкой поверхностью типа взлетно-посадочных полос в аэропортах, скошенной травой и т.п. – $k = 0,12$; открытые сельскохозяйственные земли с одиночными зданиями – $k = 0,245$; сельскохозяйственные земли с отдельными зданиями и восьмиметровыми оградами на расстоянии более 1250 м – $k = 0,275$; более 500 м – $k = 0,30$; сельскохозяйственные земли с группами зданий и восьмиметровыми оградами на расстоянии более 250 м – $k = 0,335$; деревни, малые города, сельскохозяйственные земли с отдельными зданиями и высокими оградами, лесом и резко пересеченной местностью – $k = 0,37$; большие города с высокими зданиями – $k = 0,405$; очень большие города с высокими зданиями и небоскребами – $k = 0,44$. Использование зависимости с выбором критерия k для рассматриваемой территории позволит произвести поиск критерия подобия при использовании результатов эксперимента на практике при проектировании. Понимание закономерности позволит проводить экстраполяцию условий скорости ветра при использовании результатов лабораторных исследований в аэродинамической трубе на практике.

Таким образом, аэродинамическая труба для исследования пылящих поверхностей обладает аэродинамически правильной формой постоянного круглого сечения без возможности формирования застойных зон и позволяет моделировать процесс ветрового воздействия на пылящую поверхность при размещении столика для испытуемых образцов в условиях открытого воздуха, приближенных к реальным, в условиях закрытой трубы и изолированного размещения образцов без потерь пылящего компонента. При этом вынос пыли может быть определен как по полю концентраций, формируемому в трубе после столика, так и по потере массы испытуемого пылящего компонента. Наличие приточного вентилятора, помимо вытяжного, позволяет моделировать условия возмущения или разряжения и устанавливать определенную скорость потока. Применение детурбулизирующих решеток позволяет выравнивать поле скоростей ветра, а съемных регулируемых дефлекторов – моделировать направление ветра непараллельное поверхности.

Перспективные направления исследований: продолжение исследования влияния скоростей воздушного потока в трубе, определяемых метеометром, и ветра на стандартной высоте 10 м или любой другой высоте в пределах 500 м от поверхности пылящего техногенного массива с учетом естественных и антропогенных элементов рельефа; для практического использования эмпирического показателя шероховатости подстилающей поверхности продолжение исследований, направленных на уточнение значений указанного показателя.

Заключение. Несмотря на развитие методик рассеивания загрязняющих веществ, применение их для оценки пылевого загрязнения атмосферы зачастую не позволяет получить результат,

отвечающий реальным данным мониторинга. Причиной этого является несовершенство комплексов и методик оценки масс пылепереноса. Разрабатываемый комплекс представляет новую концепцию аэродинамической установки для испытания пылящих поверхностей, решающую проблему подобия модельных условий распространения пыли реальным. Авторами разработана концепция инновационной лабораторной установки для исследования пылящих поверхностей. Построены и проанализированы поля скоростей с применением различных конструктивных решений, которые выбирались, исходя из условий лабораторных помещений и сформулированных требований к лабораторной установке.

Рекомендована установка, которая может быть эффективно применена для решения практических задач [5, 27], а именно определения выноса пыли с техногенных объектов. Это позволяет точно фиксировать негативные воздействия пылящих объектов и эффективно предотвращать их [18]. Ввиду отсутствия качественной методической и аппаратной базы для исследования средств пылеподавления частое применение этих средств не приводит к ожидаемому результату, а подтверждение эффективности может быть обеспечено лишь после внедрения. Разрабатываемый комплекс, помимо определения выноса пыли, может быть использован для исследования средств пылеподавления и определения эффективности их применения.

Разработанный комплекс позволит производить моделирование аэродинамического воздействия в двух режимах: в режиме закрытой трубы, который приблизит условия испытания к условиям, создаваемым другими установками подобного типа, что обеспечит подобие для сравнения результатов с результатами других исследований; в режиме открытой рабочей части, при котором условия приближены к реальным атмосферным.

Применение приведенной формулы позволит интерпретировать скорость воздушного потока в трубе, определяемую метеометром, в скорость ветра на любой высоте в пределах 500 м от пылящей поверхности с учетом естественных и антропогенных элементов рельефа.

Разработанная лабораторная установка может быть использована в научной-исследовательской работе, экологическом мониторинге, исследованиях, проводимых по хоздоговорам [1, 3, 29], в частности в контексте устойчивого развития [14, 15]. Результаты могут быть использованы в учебном процессе в лабораторных работах, посвященных исследованиям процессов пыления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуковский Ю.Л. Внедрение системы энергосбережения и энергоэффективности на предприятиях металлургического комплекса / Ю.Л.Жуковский, Е.В.Сизикова // Записки Горного института. 2013. Т. 202. С. 155-160.
2. Ковшов С.В. Установка для моделирования процесса пылеподавления на карьерах открытого типа путем орошения / С.В.Ковшов, Е.Б.Гридина, В.В.Иванов // Вода и экология: проблемы и решения. 2018. № 3 (75). С. 68-75. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.20.3.68-75
3. Ляшенко В.И. Повышение экологической безопасности снижением техногенной нагрузки в горнодобывающих регионах / В.И.Ляшенко, В.И.Голик, В.З.Дятчин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 7. С. 529-538. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-529-538
4. Ляшенко В.И. Складирование хвостов обогащения в виде твердеющих масс в подземном выработанном пространстве и хвостохранилище / В.И.Ляшенко, В.И.Голик, В.З.Дятчин // Обогащение руд. 2020. № 1. С. 41-47. DOI: 10.17580/or.2020.01.08
5. Разработка энергосберегающих технологий обеспечения комфортных микроклиматических условий при ведении горных работ / Б.П.Казаков, Л.Ю.Левин, А.В.Шалимов, А.В.Зайцев // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 116-124. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.116
6. Alekseenko A.V. Novorossiysk agglomeration landscapes and cement production: Geochemical impact assessment / A.V.Alekseenko, M.A.Pashkevich // XX International Scientific Symposium of Students, Postgraduates and Young Scientists on «Problems of Geology and Subsurface Development», 4-8 April 2016, Tomsk, Russia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016. Vol. 43. № 012050. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012050
7. Bykova E. Cadastral land value modelling based on zoning by prestige: A case study of a resort town / E.Bykova, M.Heldak, J.Sishchuk // Sustainability. 2020. Vol. 12. Iss. 19. № 7904. DOI: 10.3390/SU12197904
8. Danilov A.S. Use of biological adhesive for effective dust suppression in mining operations / A.S.Danilov, Y.D.Smirnov, M.A.Pashkevich // Journal of Ecological Engineering. 2015. Vol. 16. № 5. P. 9-14. DOI: 10.12911/22998993/60448
9. Development of environmental friendly dust suppressant based on the modification of soybean protein isolate / Hu Jin, Wen Nie, Yan-song Zhang et al. // Processes. 2019. Vol. 7. Iss. 3. № 165. DOI: 10.3390/PR7030165
10. Effect of wind curtain on dust extraction in rock tunnel working face: CFD and field measurement analysis / Yun Hua, Wen Nie, Qiang Liu et al. // Energy. 2020. Vol. 197. № 117214. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117214
11. Lytaeva T.A. Environmental impact of the stored dust-like zinc and iron containing wastes / T.A.Lytaeva, A.E.Isakov // Journal of Ecological Engineering. 2017. Vol.18. Iss. 3. P. 37-42. DOI: 10.12911/22998993/69355
12. Gendler S.G. Estimation and reduction of mining-induced damage of environment and work area air in mining and processing of mineral stuff for the building industry / S.G.Gendler, S.V.Kovshov // Eurasian Mining. 2016. Vol. 1. P. 45-49. DOI: 10.17580/em.2016.01.08

13. Ilyashenko I.S. Assessment of the aerotechnogenic situation in the city of St. Petersburg based on instrumental measurements of air dustiness and computer modeling of its distribution / I.S.Ilyashenko, S.V.Kovshov, E.A.Navitskaite // Journal of Ecological Engineering. 2019. Vol. 20. Iss. 4. P. 150-156. DOI: [10.12911/22998993/102808](https://doi.org/10.12911/22998993/102808)
14. Litvinenko V.S. Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector // Natural Resources Research. 2020. Vol. 29. P. 1521-1541. DOI: [10.1007/s11053-019-09568-4](https://doi.org/10.1007/s11053-019-09568-4)
15. Litvinenko V.S. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector / V.S.Litvinenko, P.S.Tsvetkov, K.V.Molodtsov // Eurasian Mining. 2020. Vol. 1. P. 36-41. DOI: [10.17580/em.2020.01.07](https://doi.org/10.17580/em.2020.01.07)
16. Matveeva V. Application of steel-smelting slags as material for reclamation of degraded lands / V.Matveeva, T.Lytaeva, A.Danilov // Journal of Ecological Engineering. 2018. Vol. 19. Iss. 6. P. 97-103. DOI: [10.12911/22998993/93511](https://doi.org/10.12911/22998993/93511)
17. Numerical study of shear stress distribution at sand ripple surface in wind tunnel flow / Nitsan Bar, Tov Elperin, Itzhak Katra, Hezi Yizhaq // Aeolian Research. 2016. Vol. 21. P. 125-130. DOI: [10.1016/j.aeolia.2016.04.007](https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.04.007)
18. Ozga M. The use of granulation to reduce dusting and manage of fine coal / M.Ozga, G.Borowski // Journal of Ecological Engineering. 2018. Vol. 19. Iss. 3. P. 218-224. DOI: [10.12911/22998993/89794](https://doi.org/10.12911/22998993/89794)
19. Pashkevich M.A. Application of polymeric materials for abating the environmental impact of mine wastes / M.A.Pashkevich, A.V.Alekseenko, T.A.Petrova // International Conference «Complex equipment of quality control laboratories», 14-17 May 2019, Saint Petersburg, Russian Federation. Journal of Physics: Conference Series, 2019. Vol. 1384. № 012039. DOI: [10.1088/1742-6596/1384/1/012039](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1384/1/012039)
20. Preparation and characterization of a novel environmentally friendly coal dust suppressant / Hu Jin, Wen Nie, Haihan Zhang et al. // Journal of Applied Polymer Science. 2019. Vol. 136. Iss. 17. № 47354. DOI: [10.1002/app.47354](https://doi.org/10.1002/app.47354)
21. Preparation and experimental dust suppression performance characterization of a novel guar gum-modification-based environmentally-friendly degradable dust suppressant / Haihan Zhang, Wen Nie, Hongkun Wang et al. // Powder Technology. 2018. Vol. 339. P. 314-325. DOI: [10.1016/j.powtec.2018.08.011](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.011)
22. Preparation and performance study of a novel polymeric spraying dust suppression agent with enhanced wetting and coagulation properties for coal mine / Haihan Zhang, Wen Nie, Jiayi Yan et al. // Powder Technology. 2020. Vol. 364. P. 901-914. DOI: [10.1016/j.powtec.2019.10.082](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.082)
23. Qianwen Zhang. Numerical investigation on aerodynamic performance and stability of a sedan under wind-bridge-tunnel road condition / Qianwen Zhang, Chuqi Su, Yiping Wang // Alexandria Engineering Journal. 2020. Vol. 59. Iss. 5. P. 3963-3980. DOI: [10.1016/j.aej.2020.07.004](https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.07.004)
24. Solidifying dust suppressant based on modified chitosan and experimental study on its dust suppression performance / Yanghao Liu, Wen Nie, Hu Jin et al. // Adsorption Science and Technology. 2018. Vol. 36 (1-2). P. 640-654. DOI: [10.1177/0263617417713624](https://doi.org/10.1177/0263617417713624)
25. Substantiation of technologies and technical means for disposal of mining and metallurgical waste in mines / V.Lyashenko, O.Khomenko, F.Topolnij, O.Helevera // Technology Audit and Production Reserves. 2020. Vol. 3. № 3(53). P. 4-11. DOI: [10.15587/2706-5448.2020.200897](https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.200897)
26. Synthesis and performance measurement of environment-friendly solidified dust suppressant for open pit coalmine / Haihan Zhang, Wen Nie, Yanghao Liu et al. // Journal of Applied Polymer Science. 2018. Vol. 135. Iss. 29. № 46505. DOI: [10.1002/app.46505](https://doi.org/10.1002/app.46505)
27. Shakhrai S.G. New technical solutions for ventilation in deep quarries / S.G.Shakhrai, G.S.Kurchin, A.G.Sorokin // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 240. P. 654-659. DOI: [10.31897/PMI.2019.6.654](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.6.654)
28. Strizhenok A. Assessment of the state of soil-vegetation complexes exposed to powder-gas emissions of nonferrous metallurgy enterprises / A.Strizhenok, D.Korelskiy // Journal of Ecological Engineering. 2016. Vol. 17. Iss. 4. P. 25-29. DOI: [10.12911/22998993/64562](https://doi.org/10.12911/22998993/64562)
29. Volkodaeva M.V. Measuring of industrial emission parameters / M.V.Volkodaeva, O.A.Taranina, V.A.Kuznecov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 194. № 062035. DOI: [10.1088/1755-1315/194/6/062035](https://doi.org/10.1088/1755-1315/194/6/062035)

Авторы: **А.В.Иванов**, канд. техн. наук, доцент, Ivanov_AV4@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1045-5052> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **Ю.Д.Смирнов**, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-2631-6674> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **С.А.Чупин**, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-4103-9636> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья принята к публикации 18.10.2021.

Выход в свет 16.12.2021.