

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-7-71-80

*Ткач Л.В., Киреев В.Е.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: koryaka_90@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ (CFD) МОДЕЛИРОВАНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ РАСХОДА В АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация. В статье исследована закономерность и выполнена количественная оценка влияния дисперсности кварцевой пыли на интенсивность абразивного износа регулятора расхода воздуха. Исследование проведено с применением методов вычислительной гидродинамики (CFD). На основе детализированной трёхмерной геометрической модели решена система уравнений Навье–Стокса, замкнутая стандартной моделью турбулентности $k-\epsilon$, с дискретным отслеживанием траекторий дисперсной фазы (кварцевая пыль, плотность 2700 кг/м^3) эквивалентными диаметрами 10, 50 и 100 мкм. Проведён комплексный сравнительный анализ с традиционным шиберным регулятором. Установлено, что минимальный износ достигается при полностью открытом положении клапана. Выявлено, что мелкие частицы (10 мкм), следуя за потоком, проникают в уплотнительные зазоры, вызывая прогрессирующий износ запорного элемента и потерю герметичности. Крупные фракции (100 мкм) вследствие высокой инерции интенсивно истирают стенки корпуса и входного патрубка, минуя клапан. Работа в частично закрытом режимекратно ускоряет эрозионное повреждение рабочих поверхностей. Выявлено, что исследуемая конструкция при скорости воздушного потока, в два раза превышающей таковую у шиберы, демонстрирует существенно меньшую интенсивность износа, что обосновывает её эффективность для длительной эксплуатации в запылённых средах.

Ключевые слова: абразивный износ, регулятор расхода воздуха, системы аспирации, CFD-моделирование, кварцевая пыль, надёжность.

Введение. Системы промышленной аспирации представляют собой сложные инженерно-технические комплексы, интегрированные в технологические цепочки горнодобывающей, металлургической, строительной, химической и перерабатывающей отраслей. Их функциональное назначение выходит за рамки простого удаления дисперсных примесей: они обеспечивают комплексную защиту производственной среды от пылевых, газовых и аэрозольных загрязнений, гарантируя соответствие жёстким требованиям промышленной безопасности, санитарно-гигиеническим нормативам (ПДК) и экологическим директивам по выбросам в атмосферу. Стабильность работы аспирационных контуров напрямую влияет на эксплуатационную надёжность основного технологического оборудования, минимизируя абразивный износ узлов, коррозионное разрушение поверхностей, перегрев приводных механизмов и риск возгорания пылевоздушных смесей. В условиях непрерывного ужесточения регуляторных требований и роста стоимости энергоресурсов, аспирационные системы трансформируются из вспомогательных коммуникаций в стратегические элементы производственной инфраструктуры, от эффективности которых зависят показатели производственной безопасности и общей себестоимости продукции.

В структуре многоконтурных и разветвлённых аспирационных сетей центральным элементом управления гидравлическим режимом выступает регулятор расхода воздуха. Его функци-

ональная роль заключается в динамической балансировке магистральных и ответвляющихся воздухопроводов, компенсации нестационарных возмущений (варьирование сопротивления фильтрующих элементов, изменение конфигурации технологических отсосов, температурно-влажностные и барические колебания среды) и поддержании заданного статического разрежения в рабочих зонах [1–2].

В условиях промышленной эксплуатации транспортируемый воздух характеризуется высокой концентрацией твёрдой фазы, обладающей выраженной абразивностью. Постоянное воздействие дисперсных частиц на рабочие поверхности проточной части, регулирующие элементы и уплотнения инициирует прогрессирующий абразивный износ, который приводит к изменению посадочных зазоров, нарушению герметичности, искажению расходных характеристик и, как следствие, к снижению производительности системы, росту гидравлических потерь и увеличению затрат на ремонтно-восстановительные работы [3]. Особую опасность в этом контексте представляют высокотвёрдые минеральные пыли, в частности кварц, широко распространённый в технологических потоках и обладающий высокой микротвёрдостью [4].

В большинстве теоретических исследований [5–9] механизмы износа классифицируются по двум основным типам: износ микрорезанием (режущий) и деформационный износ. Первый обусловлен абразивным воздействием микрочастиц

сыпучего материала, приводящим к микрорезанию поверхности, и преимущественно реализуется в пластичных средах, прежде всего в металлах и их сплавах. Деформационный износ развивается в результате многократных ударных нагрузок от транспортируемых частиц, вызывающих циклическую пластическую деформацию и накопление повреждаемости поверхностного слоя. Данный механизм является доминирующим для хрупких материалов, таких как стекло, керамика и аналогичные системы.

Несмотря на существенный прогресс в области вычислительной гидрогазодинамики (CFD) и инженерной трибологии, достигнутый за последние десятилетия, вопросы количественной оценки и прогнозного моделирования абразивного износа узлов систем аспирации, в частности регуляторов расхода воздуха, остаются недостаточно изученными и характеризуются выраженной фрагментарностью. Анализ доступных литературных источников, включая работы [10, 11], свидетельствует о том, что подавляющее большинство публикаций сосредоточено либо на макроскопическом аэродинамическом расчёте магистральных воздухопроводов и определении интегральных гидравлических потерь, либо на постфактумном эмпирическом мониторинге износа методом периодических инструментальных замеров или визуальной дефектоскопии. При этом физико-механические механизмы взаимодействия полидисперсного пылегазового потока с подвижными и неподвижными элементами регулирующих устройств не получили систематизированного описания. В существующих моделях, как правило, отсутствуют учёт реального гранулометрического распределения, морфологических характеристик частиц, их пространственно-временной концентрации вблизи рабочих поверхностей, а также динамического влияния локальных гидродинамических параметров на кинематику соударений и интенсивность съёма материала. В виду этого отсутствие верифицированных численных моделей затрудняет обоснованный выбор конструктивных решений и регламентов технического обслуживания.

Материалы и методы. Исследования выполнены на основе численного моделирования методами вычислительной гидродинамики (CFD). Выбор данного подхода в качестве основного инструмента анализа обусловлен его фундаментальными преимуществами при исследовании сложных трёхмерных, нестационарных и многофазных течений, характерных для аспирационных систем промышленного назначения. В отличие от традиционных эмпирических корреляций и упрощённых аналитических моделей, основанных на интегральных балансах, CFD-моделирование позволяет реконструировать про-

странственно-временную структуру потока с высоким разрешением, выявляя локальные зоны рециркуляции, градиенты давления, интенсивность турбулентной диссипации и траектории дисперсной фазы, которые принципиально недоступны для непосредственного экспериментального наблюдения без применения дорогостоящих оптических методов [12–14].

Применение данного подхода в качестве основного инструмента обусловлено его способностью обеспечивать высокую детализацию гидродинамических полей, значительное сокращение сроков проектирования и повышение общей эффективности разработки и оптимизации устройств различного назначения [15–19].

Математическая модель процесса была сформирована на основе системы уравнений неразрывности и Навье–Стокса, замкнутой с помощью двухпараметрической модели турбулентности $k-\varepsilon$ (стандартная реализация). В качестве граничных условий турбулентности были приняты: интенсивность турбулентных пульсаций 0,1 %, характерный масштаб турбулентности – 0,002 м. Для проведения вычислительного эксперимента построены трёхмерные геометрические модели регулятора расхода воздуха и сформирована расчётная область, дискретизированная сеточной моделью, адекватно описывающей структуру воздушных течений. Численные исследования выполнены для серии вариантов частиц кварцевой пыли с эквивалентным диаметром 10, 50 и 100 мкм. Проведён корреляционный анализ откликов системы по исследуемым факторам, оценена сходимость и достоверность полученных зависимостей.

Цель исследования: выявление факторов, определяющих интенсивность абразивного износа регулятора расхода воздуха в системах аспирации.

Ставились следующие задачи исследования:

- разработать CFD модель регулятора;
- проведение серии вычислительных экспериментов для частиц кварцевой пыли с эквивалентным диаметром 10, 50 и 100 мкм;
- выполнить сопоставительный анализ данных по износу прототипа регулирующего клапана и шибера устройства-аналога.

CFD – модель регулирующего устройства была разработана в среде SolidWorks с обеспечением геометрической ассоциативности и возможностью вариативного изменения конструктивных параметров для проведения оптимизационных исследований. В качестве дисперсной фазы исследована кварцевая пыль с плотностью 2700 кг/м³ и массовым расходом 0,001 кг/с. Анализ проведён для трёх характерных фракций с эквивалентным диаметром частиц 10, 50 и 100 мкм (гравитационные силы в расчете учитывались и не учитывались), что позволяет оценить влияние

гранулометрического состава на кинетику воздействия на поверхности регулятора. Моделирование выполнялось при номинальном расходе воздуха $0,1175 \text{ м}^3/\text{с}$, обеспечивающем среднюю скорость потока в рабочем сечении воздуховода 15 м/с , что соответствует типовым эксплуатационным режимам промышленных аспирационных систем. Во всех проведенных экспериментах варьировалось положение клапана. На рисунке 1 представлен общий вид расчетной модели.

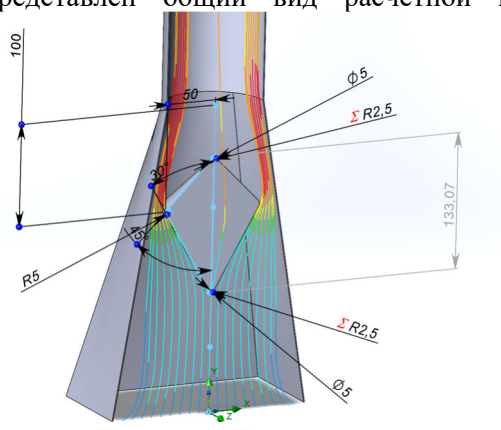


Рис. 1. Общий вид расчетной модели

Выполнен обзор и критический анализ современной научной литературы по теме исследования [20–21], установлено, что величина износа

зависит от концентрации пыли, скорости потока, твердости частиц, физико-механических свойств материала регулятора, угла соударения частиц с поверхностью и ряда других параметров.

На рисунке 2 представлены траектории движения частиц пыли диаметром 10 мкм и скорость абразивного износа частиц в местах контакта пыли с деталями клапана, вылетающих из плоскости всасывания. Моделирование осуществлялось для частиц, движущихся по линии разреза. Видно, что под действием сил всасывания частицы прижимаются к клапану и распределяются по всей поверхности нижнего конуса, после чего соударяются с нижней частью биконуса. Движение частиц происходит преимущественно по траектории воздушного потока, что обусловлено их меньшей инерционностью.

Износ элементов конструкции происходит в местах контакта с потоком пылевых частиц. Анализ траекторий показывает, что частицы диаметром 10 мкм сталкиваются с поверхностями клапана и корпуса под углом до 10° , при этом преобладает контакт трением. Согласно данным справочной литературы, такой угол соударения обуславливает низкий уровень абразивного износа соответствующих элементов регулятора расхода.

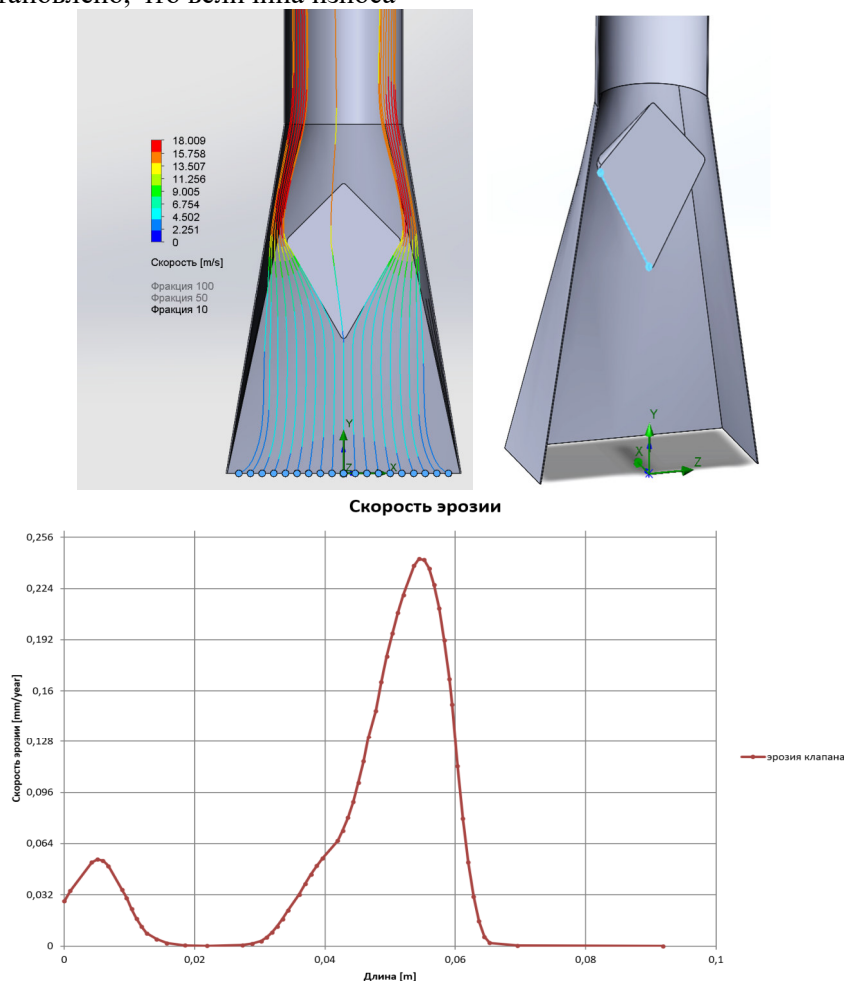


Рис. 2. Траектории движения частиц пыли диаметром 10 мкм и скорость абразивного износа частиц в местах контакта пыли с деталями клапана

На рис. 3 представлены траектории движения частиц пыли диаметром 50 мкм, вылетающих из плоскости всасывания. Моделирование осуществлялось для частиц, движущихся по линии разреза. Видно, что под действием сил всасывания частицы прижимаются к клапану и распределяются по всей плоскости нижнего конуса, после чего соударяются с нижней частью биконуса. Отразившись от биконуса, частицы ударяются о стенки патрубка (корпуса) регулятора расхода.

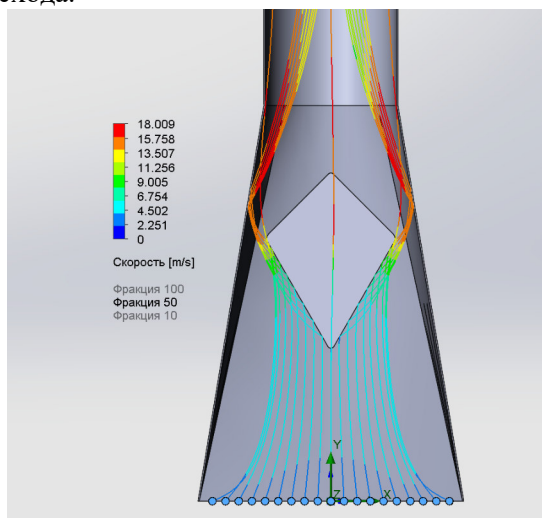


Рис. 3. Траектории движения частиц пыли диаметром 50 мкм.

Износ элементов конструкции происходит в местах контакта с потоком пылевых частиц. Анализ траекторий показывает, что частицы диаметром 50 мкм сталкиваются с поверхностями клапана и корпуса под углом до 30° . По данным справочной литературы такой угол соударения обуславливает умеренный и повышенный характер абразивного износа соответствующих элементов регулятора расхода.

На рис. 4 представлены траектории движения частиц пыли диаметром 100 мкм. и скорость абразивного износа частиц в местах контакта пыли с деталями клапана, вылетающих из плоскости всасывания. Моделирование осуществлялось для частиц, движущихся по линии разреза. Видно, что под действием сил всасывания частицы прижимаются к клапану, после чего соударяются с нижней частью биконуса. Отразившись от биконуса, частицы ударяются о стенки патрубка (корпуса) регулятора расхода.

Износ элементов конструкции происходит в местах контакта с потоком пылевых частиц. Анализ траекторий показывает, что частицы диаметром 100 мкм сталкиваются с поверхностями клапана и корпуса под углом $30-60^\circ$. По данным справочной литературы такой угол соударения обуславливает умеренный характер абразивного износа соответствующих элементов регулятора расхода.

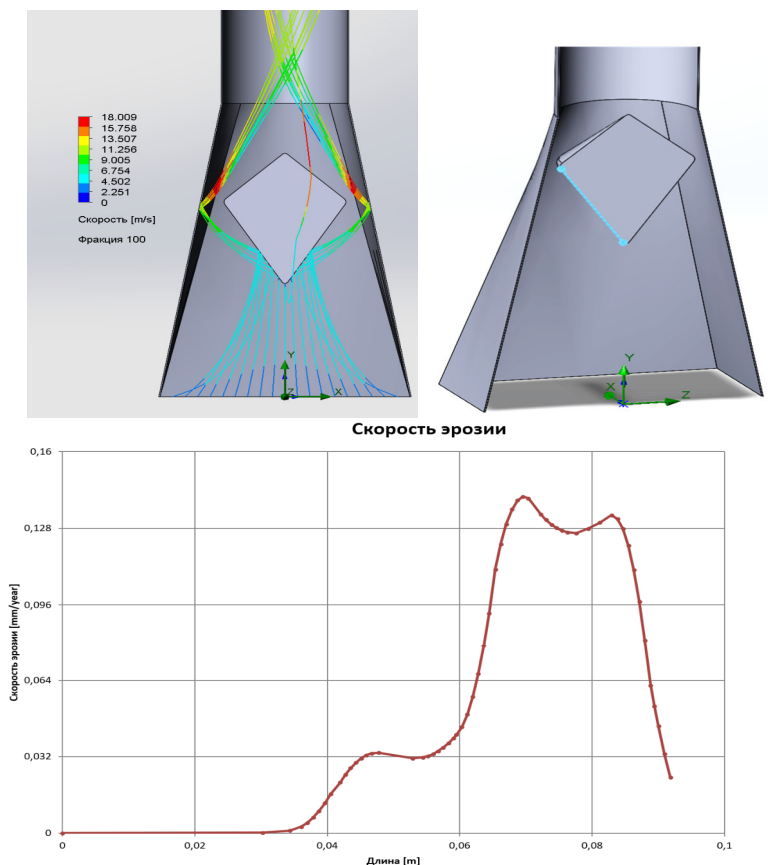


Рис. 4. Траектории движения частиц пыли диаметром 100 мкм и скорость абразивного износа частиц в местах контакта пыли с деталями клапана

На рисунках 5, 6 представлены результаты численного моделирования движения пылевых частиц при практически закрытом клапане.

На рисунке 7 визуализировано исследование абразивного износа регулятора расхода в открытом состоянии.

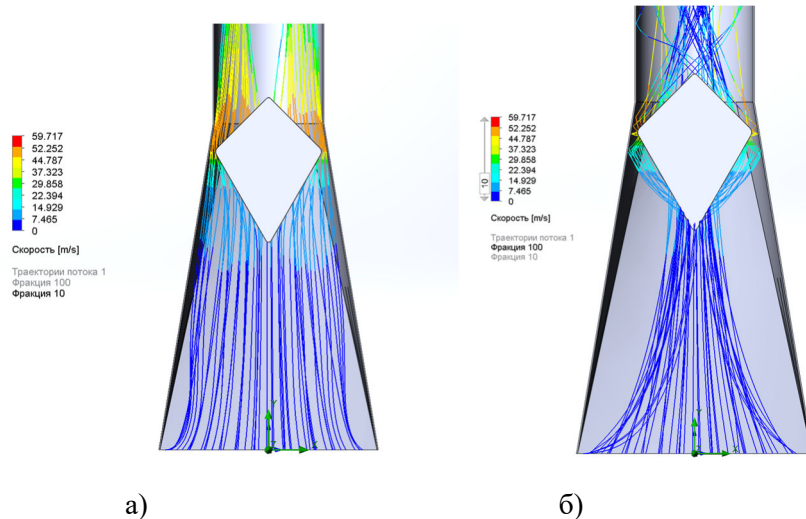


Рис. 5. Траектории движения пылевых частиц $d=10$ мкм. (а) и $d=100$ мкм (б)

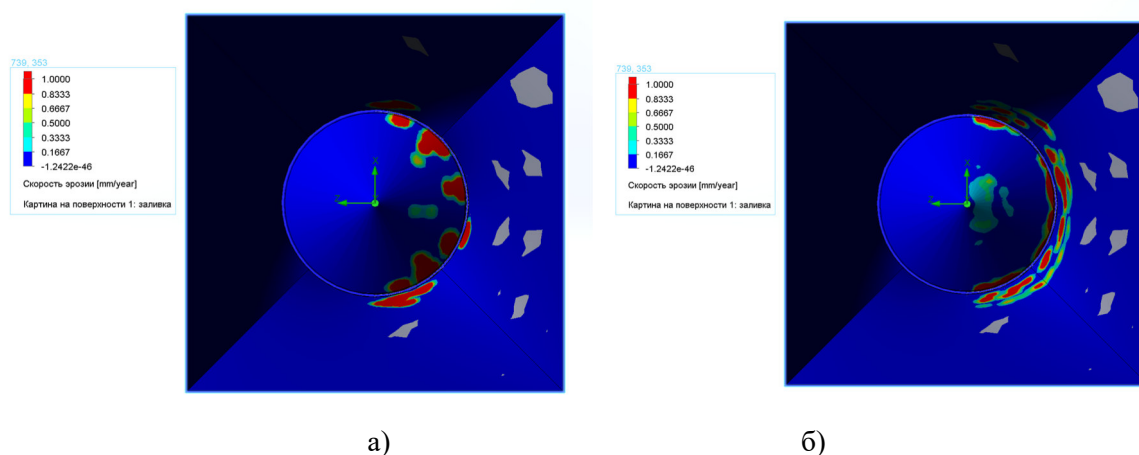


Рис. 6. Скорость абразивного износа в местах контакта пыли $d=10$ мкм. (а) и $d=100$ мкм (б) с деталями клапана

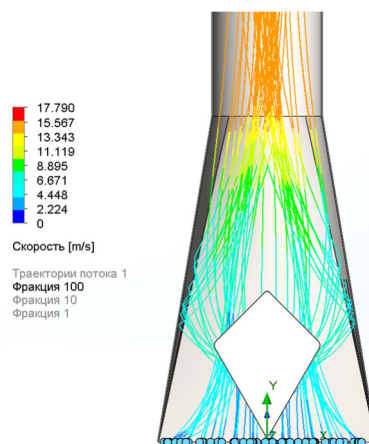


Рис. 7. Траектории движения частиц пыли диаметром 10, 50 и 100 мкм

Для сравнительного анализа полученных данных по разрабатываемому устройству было

проведено исследование абразивного износа существующего регулятора (шибера) в идентичных условиях эксплуатации.

Важно отметить, что скорость движения воздуха в области работы шибера ниже в 2 раза, при этом возникает большая скорость абразивного

износа. На рисунках 9, 10 представлены полученные данные по исследованию шибера устройства.

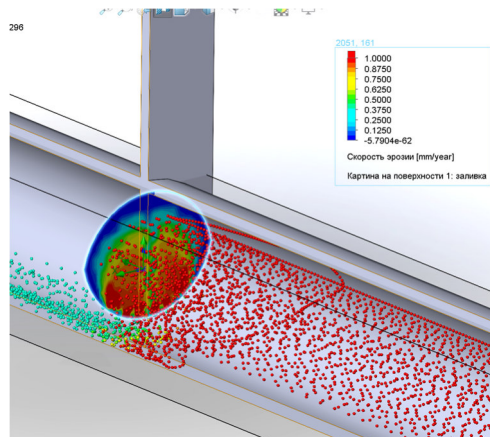


Рис. 9. Траектории движения частиц пыли $d=100$ мкм и скорость абразивного износа шибера

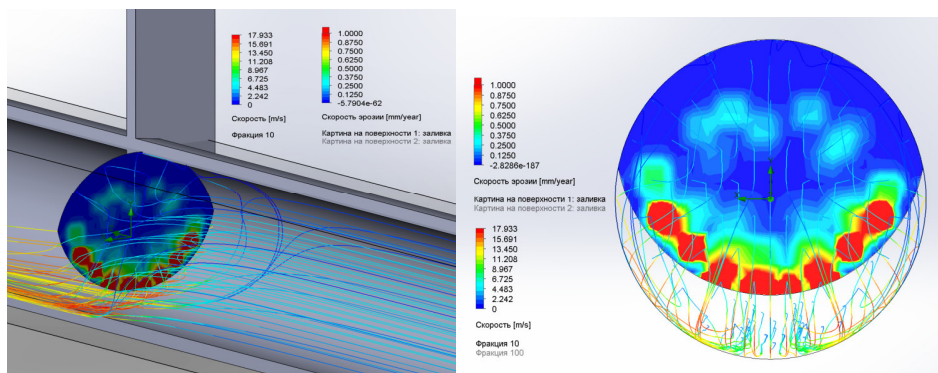


Рис. 10. Траектории движения частиц пыли $d=10$ мкм и скорость абразивного износа шибера

Выводы: В статье обоснована необходимость оптимизации систем промышленной вентиляции и аспирации, уделяя особое внимание совершенствованию методов управления воздушными потоками посредством регулирующих устройств. Целью исследования являлись выявление факторов, определяющих интенсивность абразивного износа регулятора расхода воздуха в системах аспирации. Трёхмерная геометрическая модель регулирующего устройства сформирована в среде SolidWorks. В работе исследована зависимость интенсивности абразивного износа рабочих поверхностей от дисперсности частиц кварцевой пыли. Установлено, что разработанная CFD-модель обладает достаточной достоверностью и может быть применена в качестве базового инструмента для дальнейших научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Интеграция специализированных CAD/CAE-решений на этапах проектирования позволяет существенно сократить трудоёмкость и временные затраты при анализе и оптимизации вентиляционного оборудования. Полученные в результате исследования данные позволяют установить количественные зависимости между параметрами

пылегазового потока, геометрией регулятора и локальной интенсивностью износа его элементов. Результаты работы могут быть использованы при проектировании износостойких регулирующих устройств, оптимизации аэродинамических схем проточной части, разработке методик прогнозирования остаточного ресурса и формировании научно обоснованных регламентов технического обслуживания аспирационных сетей.

По результатам проведённого CFD-анализа сформулированы основные выводы исследования:

1. Разработана верифицированная численная CFD-модель регулирующего устройства, предназначенная для проведения дальнейших исследований, направленных на оптимизацию процессов управления в аспирационных системах. Использование данной модели позволяет осуществлять виртуальное тестирование, анализировать влияние конструктивных модификаций на аэродинамические параметры системы, а также определять скорость абразивного износа устройства.

2. Проведена серия вычислительных экспериментов для частиц кварцевой пыли с эквивалентным диаметром 10, 50 и 100 мкм, по результатам которых установлено следующее:

- режим работы: минимальный износ достигается при работе регулятора в полностью открытом положении – низкая скорость потока и турбулентность снижают механическую нагрузку на детали. Работа в частично закрытом режиме ускоряет износ.

- влияние крупных частиц: крупные абразивные частицы из-за высокой инерции ударяются о стенки корпуса и патрубка, вызывая их интенсивное истирание; клапан при этом страдает в меньшей степени.

- влияние мелких частиц: мелкая пыль проникает в узкие зазоры между клапаном и седлом, вызывая износ именно запорного элемента, что ведёт к потере герметичности и ухудшению регулирующих характеристик.

3. В рамках сравнительного анализа данных по разрабатываемому устройству было проведено исследование абразивного износа существующего регулятора (шибера) в идентичных условиях эксплуатации. Установлено, что скорость движения воздуха в рабочей области шибера, в 2 раза меньше по сравнению с прототипом, при этом наблюдается более высокая интенсивность абразивного износа. Это свидетельствует о недостаточной износостойкости конструкции шибера при аналогичных эксплуатационных нагрузках.

На основе результатов проведённого исследования были сформулированы практические рекомендации, направленные на оптимизацию процесса разработки клапана:

- для сред с крупными частицами рекомендуется использовать износостойкие покрытия или сменные вставки в патрубках и корпусах;

- при наличии мелкой пыли особое внимание уделяют материалам и конструкции клапана, а также качеству фильтрации;

- регулярная инспекция и обслуживание должны учитывать преобладающий тип износа в зависимости от условий эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аверкова О.А., Логачев К. И., Уваров В.А. Энергосбережение в системах вытяжной вентиляции // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 11(63). С. 137–146. EDN: VMYVMX

2. Волков В. А. Регуляторы расхода воздуха VAV - основа системы кондиционирования с переменным расходом воздуха // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха,

теплоснабжение и строительная теплофизика. 2011. № 4. С. 38–41. EDN NUOBZV

3. Путилов В.Я., Путилова И.В. Зависимость абразивного износа пневмотранспортных трубопроводов ТЭС от критерия аэродинамической легкости частиц транспортируемого материала // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2007. № 2. С. 63–67. EDN: IALAYV

4. Bitter I.Y.A. A Study of Erosion Phenomena // Wear. 1963. Vol.6. Pp. 5–21.

5. Smeltzer C.E., Gulden M.E., Compton W.A. Mechanisms of metal removal by impacting dust particles // Journal of Basic Engineering. 1970. Vol. 92(3). Pp. 639–652.

6. Neilson J.H., Gilkrist A. Erosion by a Stream of Solid Particles // Wear. 1968. Vol.11. Pp. 111–122. DOI: 10.1016/0043-1648(68)90591-7

7. Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles // Wear. 1960. No. 3. Pp. 87–103. DOI: 10.1016/0043-1648(60)90055-7

8. Beckmann G. Eine Modification der Verschleibgrundgleichung // Schmierungstechnik, 1978. Vol. 9. No 12. Pp. 362–365.

9. Sundararajan G., Shewmon P.G. A new Model for the Erosion of Metals at Normal Incidence // Wear. 1983. Vol.84. №2. Pp. 237–258. DOI: 10.1016/0043-1648(83)90266-1

10. Бородин А.А. Расчет аэродинамических параметров вентиляционной сети // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2021. № 4. С. 58–61. EDN: IPTTRS

11. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации. Санкт-Петербург: Изд-во Химиздат, 2005. 659 с. EDN TIRZFF

12. Гольцов А.Б., Логачев К.И., Аверкова О.А., Елистратова Ю.В., Семиненко А.С. Численное моделирование воздушного потока в аспирационной воронке с выравнивающим устройством // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 7(787). С. 64–75. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-787-7-64-75 EDN: ECUIGS

13. Gol'tsov A.B., Logachev K.I., Ovsyannikov Y.G., Kireev V.M. Numerical Simulation of Air Flows in the Loading Chute of an Aspiration Shelter with Multistage Recirculation Air Seal // Refractories and Industrial Ceramics. 2021. Vol. 61(6). Pp. 727–734. DOI: 10.1007/s11148-021-00550-3. EDN: JCJQDU

14. Ткач Л.В., Гольцов А.Б., Михайлов А.И., Шалпегин Д.С. Исследование местного сопротивления шибберных задвижек в вентиляционных и аспирационных системах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 5. С. 16–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-16-2.

EDN: ARMANU

15. Нагорная А.Н., Денисюк Е.В. CFD-моделирование теплового и воздушного режима кинотеатра // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Т. 13. № 2. С. 61–64. EDN: RPVCOF

16. Ganegama Bogodage S., Leung A.Y.T. CFD simulation of cyclone separators to reduce air pollution // Powder Technology. 2015. (286). Pp. 488–506.

17. Гольцов А.Б., Логачев К.И., Семенов А.С., Киреев В.М., Елистратова Ю.В., Серых И.Р., Чернышева Е.В. Выравнивание потоков в аспирационных патрубках // Экология промышленного производства. 2024. № 2(126). С. 46–57. DOI: 10.52190/2073-2589_2024_2_46. EDN: CLZMNY

18. Гольцов А.Б. Выявление факторов, влия-

ющих на равномерность всасывания аспирационными воронками // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 1. С. 19–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-19-31 EDN: QLNJGE

19. Логачев К.И., Попов Е.Н., Козлов Т.А., Зиганшин А.М., Аверкова О.А. Моделирование отрывного воздушного потока при входе в квадратный отсос сообщение 1. Методы исследования // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 6(774). С. 39–53. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-774-6-39-53. EDN: EAKOSQ

20. Mills D. Pneumatic Conveying Design Guide. 3rd Edition. Butterworth-Heinemann, 2016, 688 p.

21. Зайцев М.В. Абразивный износ пневматических трубопроводов и возможные способы его предотвращения // Велес. 2016. № 3-2(33). С. 37–41. EDN: WWWOSL

Информация об авторах

Ткач Людмила Владимировна, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: koryaka_90@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Киреев Владимир Евгеньевич, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: vova-kireev-1997@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 29.05.2026 г.

© Ткач Л.В., Киреев В.Е., 2026

***Tkach L.V., Kireev V.E.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**E-mail: koryaka_90@mail.ru*

NUMERICAL (CFD) SIMULATION OF ABRASIVE WEAR DURING FLOW CONTROL IN ASPIRATION SYSTEMS

Abstract. The article studies the pattern and quantifies the effect of quartz dust dispersion on the intensity of abrasive wear of the air flow regulator. The study was conducted using computational fluid dynamics (CFD) methods. Based on a detailed three-dimensional geometric model, the system of Navier–Stokes equations was solved using the standard $k-\epsilon$ turbulence model, with discrete tracking of the trajectories of the dispersed phase (quartz dust, density of 2700 kg/m^3) with equivalent diameters of 10, 50, and $100 \mu\text{m}$. A comprehensive comparative analysis was conducted with a traditional slide regulator. It was found that the minimum wear is achieved when the valve is fully open. It has been revealed that small particles ($10 \mu\text{m}$), following the flow, penetrate into the sealing gaps, causing progressive wear of the locking element and loss of tightness. Large fractions ($100 \mu\text{m}$), due to high inertia, intensively abrade the walls of the housing and inlet pipe, bypassing the valve. Operation in a partially closed mode multiplies the erosion damage of working surfaces. It has been revealed that the studied design, with an air flow rate twice as high as that of the gate valve, demonstrates significantly lower wear intensity, which justifies its effectiveness for long-term operation in dusty environments.

Keywords: abrasive wear, air flow regulator, aspiration systems, CFD modeling, quartz dust, reliability.

REFERENCES

1. Averkova O.A., Logachev K.I., Uvarov V.A. Energy Saving in Exhaust Ventilation Systems

[Energoberezhenie v sistemah vytyazhnoy ventilatsii]. Construction and industrial safety. 2018. No.11(63). Pp. 137–146. EDN: VMYVMX. (rus)

2. Volkov, V. A. VAV Air Flow Regulators -

the Basis of a Variable Air Flow Air Conditioning System [Regulyatory raskhoda vozduha VAV - osnova sistemy kondicionirovaniya s peremennym raskhom vozduha]. AVOK: Ventilyaciya, otoplenie, kondicionirovanie vozduha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika. 2011. No. 4. Pp. 38–41. (rus)

3. Putilov V. Ya., I. V. Putilova. Dependence of the abrasive wear of thermal power plant pneumatic conveying pipelines on the aerodynamic lightness criterion of the transported material particles [Zavisimost' abrazivnogo iznosa pnevмотransportnyh truboprovodov TES ot krite-riya aerodinamicheskoy legkosti chastic transportiruемого материала]. Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of MPEI. 2007. No. 2. Pp. 63–67. EDN: IALAYV. (rus)

4. Bitter I.Y.A. A Study of Erosion Phenomena. Wear. 1963. Vol. 6. Pp. 5–21.

5. Smeltzer C.E., Gulden M.E., Compton W.A. Mechanisms of metal removal by impacting dust particles. Journal of Basic Engineering. 1970. Vol. 92(3). Pp. 639–652.

6. Neilson J.H., Gilkrist A. Erosion by a Stream of Solid Particles. Wear. 1968. Vol. 11. Pp. 111–122. DOI: 10.1016/0043-1648(68)90591-7.

7. Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles. Wear. 1960. No. 3. Pp. 87–103. DOI: 10.1016/0043-1648(60)90055-7.

8. Beckmann G. Eine Modification der Verschleibgrundgleichung. Schmierungstechnik. 1978. Vol. 9. No. 12. Pp. 362–365.

9. Sundararajan G., Shewmon P.G. A new Model for the Erosion of Metals at Normal Incidence. Wear. 1983. Vol. 84. No. 2. Pp. 237–258. DOI: 10.1016/0043-1648(83)90266-1.

10. Borodkin A.A. Calculation of aerodynamic parameters of a ventilation network [Raschet aerodinamicheskikh parametrov ventilyatsionnoy seti]. AVOK: Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermophysics. 2021. No. 4. Pp. 58–61. EDN: IPTTRS. (rus)

11. Logachev I.N., Logachev K.I. Aerodynamic Fundamentals of Aspiration [Aerodinamicheskie osnovy aspiracii]. St. Petersburg: Khimizdat, 2005. 659 p. (rus)

12. Goltsov A.B., Logachev K.I., Averkova O.A., Yelistratova Yu.V., Seminenko A.S. Numerical simulation of air flow in an aspiration funnel with a flow-straightening device [Chislennoe modelirovanie vozdušnogo potoka v aspiratsionnoy voronke s vyravnivayushchim ustroystvom]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitelstvo. 2024. No. 7(787). Pp. 64–75. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-787-7-64-75. EDN: ECUIGS. (rus)

13. Goltsov A.B., Logachev K.I., Ovsyannikov Y.G., Kireev V.M. Numerical Simulation of Air

Flows in the Loading Chute of an Aspiration Shelter with Multistage Recirculation Air Seal. Refractories and Industrial Ceramics. 2021. Vol. 61(6). Pp. 727–734. DOI: 10.1007/s11148-021-00550-3. EDN: JCJQDU

14. Tkach L.V., Goltsov A.B., Mikhailov A.I., Shalpegin D.S. Study of local resistance of gate valves in ventilation and aspiration systems [Issledovanie mestnogo soprotivleniya shibernykh zadvizhek v ventilyatsionnykh i aspiratsionnykh sistemakh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 5. Pp. 16–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-16-25. EDN: ARMAHY. (rus)

15. Nagornaya A.N., Denisyuk E.V. CFD Modeling of the Thermal and Air Conditions in a Cinema [CFD-modelirovanie teplovogo i vozdušnogo rezhima kinoteatra]. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture. 2013. Vol. 13. No. 2. Pp. 61–64. EDN: RPVCOF. (rus)

16. Ganegama Bogodage S., Leung A.Y.T. CFD simulation of cyclone separators to reduce air pollution. Powder Technology. 2015. No. 286. Pp. 488–506.

17. Goltsov A.B., Logachev K.I., Seminenko A.S., Kireev V.M., Yelistratova Yu.V., Serykh I.R., Chernysheva E.V. Flow straightening in aspiration nozzles [Vyravnivanie potokov v aspiratsionnykh patrulkakh]. Ecology of Industrial Production. 2024. No. 2(126). Pp. 46–57. DOI: 10.52190/2073-2589_2024_2_46. EDN: CLZMNY. (rus)

18. Goltsov A.B. Identification of factors affecting the uniformity of suction by aspiration funnels [Vyyavlenie faktorov, vliyayushchikh na ravnomernost vsasyvaniya aspiratsionnymi voronkami]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 1. Pp. 19–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-19-31. EDN: QLNJGE. (rus)

19. Logachev K.I., Popov E.N., Kozlov T.A., Ziganshin A.M., Averkova O.A. Simulation of separated air flow at the inlet to a square exhaust hood. Report 1. Research methods [Modelirovanie otryvnogo vozdušnogo potoka pri vkhode v kvadratnyy otssos soobshchenie 1. Metody issledovaniya]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitelstvo. 2023. No. 6(774). Pp. 39–53. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-774-6-39-53. EDN: EAKOSQ. (rus)

20. Mills D. Pneumatic Conveying Design Guide. 3rd Edition. Butterworth-Heinemann. 2016. 688 p.

21. Zaitsev M.V. Abrasive wear of pneumatic pipelines and possible ways to prevent it [Abrazivnyy iznos pnevmaticheskikh truboprovodov i vozmozhnye sposoby ego predotvrashcheniya]. Veleles. 2016. No. 3-2(33). Pp. 37–41. EDN: WWWOSL. (rus)

Information about the authors

Tkach, Lyudmila V. Postgraduate student. E-mail: koryaka_90@maik.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova Street, 46.

Kireev, Vladimir E. Postgraduate student. E-mail: koryaka_90@maik.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova Street, 46.

Received 29.05.2026

Для цитирования:

Ткач Л.В., Киреев В.Е. Численное (CFD) моделирование абразивного износа при регулировании расхода в аспирационных системах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 7. С. 71–80. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-7-71-80

For citation:

Tkach L.V., Kireev V.E. Numerical (CFD) simulation of abrasive wear during flow control in aspiration systems. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 7. Pp. 71–80. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-7-71-80