

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ВПУСКНОГО ВОЗДУХА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ГОРНЫХ МАШИН



Джураев Р.У.,
Навоийский государственный
горно-технологический
университет, д.т.н., профессор



Каюмов У.А.,
Навоийский государственный горно-
технологический университет,
старший преподаватель

Аннотация. В условиях открытых горных работ двигатели внутреннего сгорания эксплуатируются в среде с повышенной концентрацией абразивной пыли, что приводит к интенсивному износу цилиндро-поршневой группы, снижению мощности, увеличению расхода топлива и сокращению ресурса двигателя. В статье выполнен комплексный анализ влияния дисперсного состава и концентрации пылевых частиц во впускном воздухе на трибологическое состояние основных узлов двигателя, параметры масляной плёнки и эксплуатационные показатели силовой установки. Показано, что наибольшую опасность представляют частицы размером 5–20 мкм, вызывающие ускоренный абразивный износ и ухудшение герметичности камеры сгорания. На основе теоретических и эксплуатационных данных обоснована необходимость повышения эффективности очистки впускного воздуха.

Разработана и предложена конструкция многоступенчатого комбинированного воздушного фильтра, включающего мультициклонную предварительную очистку и двухступенчатую электростатическую сепарацию с последующей доочисткой стандартным фильтрующим элементом. Предлагаемая схема обеспечивает улавливание частиц в широком диапазоне размеров (0,1–20 мкм) при низком аэродинамическом сопротивлении и повышает общую эффективность очистки до 95%. Применение разработанной системы позволяет снизить интенсивность износа цилиндро-поршневой группы, увеличить ресурс базового фильтра и двигателя в целом, уменьшить удельный расход топлива и повысить надёжность эксплуатации горных машин в условиях высокой запылённости.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, воздушный фильтр, загрязнение воздуха, износ, цилиндр, поршень, кольца, частица пыли, интенсивность износа, ресурс ДВС, мощность ДВС, фильтрация, абразивные частицы, многоступенчатая очистка, мультициклон, электростатическая фильтрация, ресурс двигателя

KON MASHINALARI ICHKI YONUV DVIGATELLARINING KIRISH HAVOSINI TOZALASH SAMARADORLIGINI OSHIRISH IMKONIYATLARI

Djuraev R.U., Kayumov U.E.

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, O'zbekiston Respublikasi

Annotatsiya. Ochiq kon ishlari sharoitida ichki yonuv dvigatellari yuqori konsentratsiyadagi abraziv chang muhitida ishlaydi, bu esa silindr-porshen guruhining jadal yedirilishiga, dvigatel quvvatining pasayishiga, yoqilg'i sarfining ortishiga hamda dvigatel resursining qisqarishiga olib keladi. Mazkur maqolada kirish havosi tarkibidagi chang zarrachalarining dispers tarkibi va konsentratsiyasining dvigatelning asosiy birikmalari tribologik holatiga, moy plynkasi parametrlariga hamda kuch qurilmasining ekspluatatsion ko'rsatkichlariga ta'sir komplekslari tahlil qilingan. Tadqiqot natijalariga ko'ra, o'lchami 5–20 mkm bo'lgan zarrachalar eng katta xavf tug'dirib, tezlashgan abraziv yedirilish hamda yonish kamerasining germetikligi yomonlashishiga sabab bo'lishi aniqlangan. Nazariy va ekspluatatsion ma'lumotlar asosida kirish havosini tozalash samaradorligini oshirish zarurati ilmiy jihatdan asoslab berilgan.

Ishda ko'p bosqichli kombinatsiyalashgan havo filtri konstruksiyasi ishlab chiqilib taklif etilgan bo'lib, u multitsiklonli dastlabki tozalash, ikki bosqichli elektrostatik ajratish hamda standart filtrlovchi element orqali yakuniy tozalash jarayonlarini o'z ichiga oladi. Taklif etilgan tizim 0,1–20 mkm o'lchamdagi zarrachalarni past aerodinamik qarshilik sharoitida ushlab qolishni ta'minlab, umumiy tozalash samaradorligini 95% gacha oshiradi. Ishlab chiqilgan tizimni qo'llash silindr-porshen guruhining yedirilish jadalligini kamaytirish, asosiy filtr va dvigatel resursini oshirish, yoqilg'ining solishtirma sarfini kamaytirish hamda yuqori changlangan sharoitlarda kon mashinalarining ekspluatatsion ishonchligini oshirish imkonini beradi.

Kalit so'zlar: ichki yonuv dvigateli, havo filtri, havoning ifloslanishi, yedirilish, silindr, porshen, porshen halqalari, chang zarrachasi, yedirilish jadalligi, dvigatel resursi, dvigatel quvvati, filtratsiya, abraziv zarrachalar, ko'p bosqichli tozalash, multitsiklon, elektrostatik filtrlash.

OPPORTUNITIES FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF INTAKE AIR CLEANING IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES OF MINING MACHINERY

Djuraev R.U., Kauymov U.E.

Navoi State University of Mining and Technologies, Republic of Uzbekistan

Abstract. Under open-pit mining conditions, internal combustion engines operate in environments with a high concentration of abrasive dust, which leads to intensive wear of the cylinder–piston group, power reduction, increased fuel consumption, and a decrease in engine service life. This paper presents a comprehensive analysis of the influence of the particle size distribution and concentration of dust in the intake air on the tribological condition of key engine components, the parameters of the oil film, and the operational performance of the power unit. It is shown that particles with sizes of 5–20 μm pose the greatest risk, causing accelerated abrasive wear and deterioration of combustion chamber sealing. Based on theoretical considerations and operational data, the necessity of improving the efficiency of intake air purification is substantiated.

A design of a multi-stage combined air filtration system is developed and proposed, including multicyclone pre-cleaning, two-stage electrostatic separation, and final purification using a conventional filter element. The proposed system ensures effective capture of particles within a wide size range (0.1–20 μm) under low aerodynamic resistance and increases the overall filtration efficiency up to 95%. The implementation of the developed system makes it possible to reduce the wear rate of the cylinder–piston group, extend the service life of both the base filter and the engine as a whole, decrease specific fuel consumption, and improve the operational reliability of mining machines under high-dust conditions.

Keywords: internal combustion engine, air filter, air pollution, wear, cylinder, piston, piston rings, dust particles, wear rate, engine service life, engine power, filtration, abrasive particles, multi-stage filtration, multicyclone, electrostatic filtration, engine durability.

Введение

Надёжность эксплуатации и ресурсосбережение горных машин означают снижение производственных затрат с целью повышения высокой экономической эффективности не только на уровне отдельных хозяйствующих субъектов, но и в масштабах государства в целом. В настоящее время в связи с истощением запасов многих месторождений полезных ископаемых, расположенных в благоприятных геологических условиях и на высоких горизонтах, возникает необходимость интенсификации добычи новых запасов полезных ископаемых. Однако большинство запасов полезных ископаемых залегает на больших глубинах и в сложных геологических условиях, вследствие чего процессы их добычи и транспортировки являются достаточно сложными [1].

При эффективной разработке месторождений полезных ископаемых и выполнении установленных производственных планов роль машин и механизмов, оснащённых двигателями внутреннего сгорания, является исключительно важной, а обеспечение их эксплуатационной надёжности и ресурсосбережения относится к числу актуальных проблем.

Эксплуатация двигателей внутреннего сгорания в условиях высокой запылённости воздушной среды оказывает серьёзное влияние на их техническое состояние и срок службы. Известно, что наличие в воздухе твёрдых частиц, особенно мелкодисперсных фракций размером менее 10 μm , существенно ускоряет процессы абразивного, адгезионного и коррозионно-механического износа.

Во время движения автотранспорт засасывает окружающий воздух, содержащий определённое количество пыли. В сухую погоду её концентрация достигает около 60–70 мг/м^3 , в состав пыли входят оксиды кальция, железа, кремния и другие компоненты [2].

Поверхностная твёрдость пылевых частиц оксида кремния (кварца) в 2 раза превышает твёрдость высококачественных сталей. Двигатель средней мощности за 1 час работы засасывает приблизительно 3000 м^3 воздуха. При отсутствии очистки воздуха в течение одной рабочей смены в цилиндры двигателя может попасть несколько килограммов пыли. Твёрдые частицы вызывают интенсивный износ цилиндров, поршней и других трущихся

деталей, что приводит к значительному сокращению срока службы двигателя.

Материалы и методы.

Минеральная пыль, формирующаяся при буровзрывных, экскавационных и транспортных работах, характеризуется высокой абразивной способностью. Размеры частиц пыли варьируются от 1 до 100 μm . Особенно опасны мелкодисперсные фракции размером менее 10 μm , способные проникать через фильтрующие элементы воздушных систем и оказывать разрушительное воздействие на цилиндро-поршневую группу.

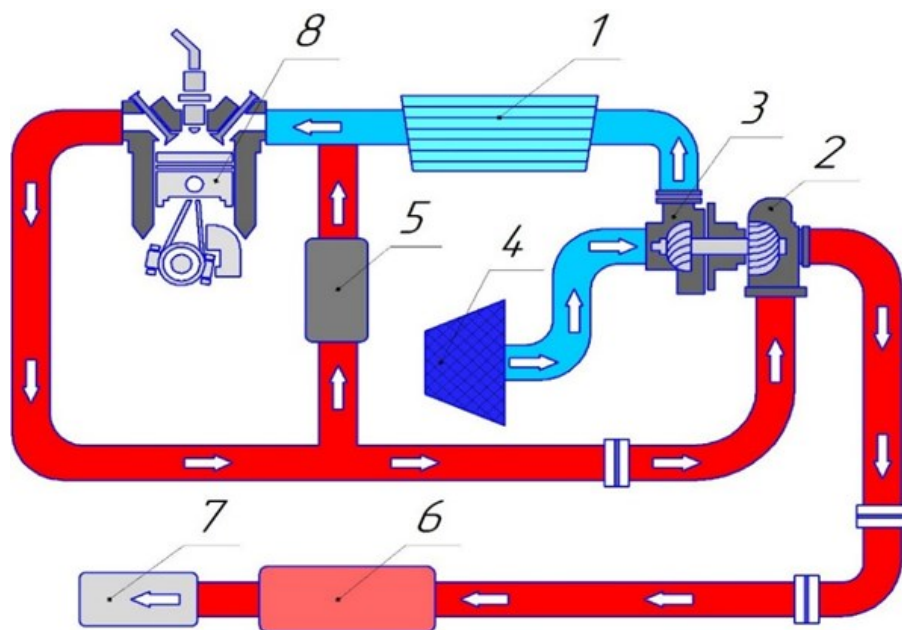
Работа двигателя внутреннего сгорания в условиях высокой пылевой среды сопровождается множеством деструктивных процессов, которые затрагивают как воздухозаборную систему, так и элементы цилиндро-поршневого узла, турбонаддув, систему смазки и даже систему охлаждения. На рисунке 1 показана функциональная структура впускной системы двигателя внутреннего сгорания и совокупность её элементов, которая показывает соприкосновение пылевых частиц, проникший в двигатель с воздухом с её основными узлами.

Когда двигатели внутреннего сгорания получают достаточно чистый воздух, снижение их мощности в процессе эксплуатации в среднем не превышает 5–7%. Эта ситуация связана с обычным износом цилиндро-поршневой группы, а интенсивность деградации показателей остаётся в пределах допустимых эксплуатационных норм.

В условиях высокой запылённости двигатели внутреннего сгорания теряют в мощности в среднем до 15–18%, что объясняется абразивным износом деталей цилиндро-поршневой группы. Загрязняющие частицы попадают в цилиндр, действуют как твёрдый абразив и ускоряют износ стенок цилиндра, поршневых колец, втулок поршневого пальца и основных подшипников. В результате увеличивается утечка газов, падает степень сжатия и растёт доля механических потерь [3;4].

Кроме того, из-за загрязнения моторного масла абразивными частицами ухудшаются его свойства, увеличиваются силы трения, что также приводит к снижению мощности двигателя.

В пыльной среде воздухозаборная система быстро загрязняется, фильтры теряют пропускную способность. Это ведёт к росту



1 – охладитель воздуха (интеркулер), 2 – турбина, 3 – компрессор, 4 – воздушный фильтр, 5 – система ЕГР, 6 – дизельный сажевый фильтр, 7 – выпускной глушитель, 8 – ДВС.

Рис. 1. функциональная структура впускной системы двигателя внутреннего сгорания.

сопротивления на впуске и снижению мощности двигателя, а также повышенному расходу воздушного фильтра что также приводит к увеличению эксплуатационных затрат. На рисунке 2 показана воздушный фильтр карьерного автосамосвала до эксплуатации и после эксплуатации 50 мото-часов.

Из выше приведенного рисунка видно, что за 50 мото-часов эксплуатации воздушный фильтр полностью загрязнился, в то время как её ресурс является 250 мото-часов, то есть ресурс фильтра сократился в 5 раз.



А-до эксплуатации; Б-после эксплуатации 50 мото-часов.

Рис. 2. Загрязненность воздушного фильтра карьерного автосамосвала.

Вместе с потоком всасываемого воздуха в цилиндры двигателя попадает значительное количество загрязняющих веществ. Величину расхода воздуха на впуске двигателя внутреннего сгорания можно определить по теоретическому соотношению:

$$Q_{вп} = \frac{V_d \cdot n_d \cdot \eta_n \cdot 60}{1000 \cdot k} \quad (1)$$

где: V_d – рабочий объём двигателя [дм³],

n_d – частота вращения двигателя [об/мин],
 k – кратность хода поршня (2 – для четырёхтактных двигателей, 1 – для двухтактных),
 η_n – коэффициент наполнения, значение которого следует принимать в зависимости от типа двигателя. Для двигателя без наддува $\eta_n = 0,85$, для двигателя с наддувом и воздушным охлаждением $\eta_n = 1,85$ [5].

Максимальный объёмный расход воздуха, формируемый во впускной такт при достижении двигателем предельного режима

мощности $n_{д, max}$, для рассматриваемых силовых установок определяется следующей величиной:

Таблица 1

Сравнительные параметры двигателей карьерных автосамосвалов и их максимальный расход воздуха на впуске

Автосамосвал/ двигатель	Рабочий объём двигателя (L)	Крутящий момент (макс.)	Расхода воздуха на впуске (м³/ч)	Реалистичный диапазон расхода воздуха на впуске
БелАЗ (вариант с Cummins KTA50)	50.3	1800	4995	4724 – 5267.
CAT 785C (Cat 3512B)	51.8	1750	4953	4681 – 5225.
Komatsu HD785-7 (SAA12V140E-3)	30.5	1900	3164	2990 – 3338.

В процесс всасывания рабочей смеси неизбежно вовлекаются посторонние аэрозольные и твердые частицы, которые в значительных количествах проникают в цилиндры двигателя вместе с воздухом. Например, в ходе эксплуатации автосамосвала двигатель с рабочим объемом $V_d = 30 \text{ дм}^3$, передвигаясь по твердым покрытиям со средней скоростью $v = 35 \text{ км/ч}$ и при концентрации пыли в атмосфере $C_m = 10 \text{ мг/м}^3$, в цилиндры двигателя за пробег 20 000 км поступает свыше 7,32 кг пылевых частиц вместе с всасываемым воздухом.

Пылевые частицы попадая в цилиндро-поршневую группу вследствие наличия в нём твёрдых частиц, проявляют абразивное разрушение поверхностей узлов, смазываемых моторным маслом.

Корректная и долговечная работа которых обеспечивается наличием смазочной среды. Смазка формирует разделяющую плёнку, уменьшающую механические потери на трение и существенно снижая интенсивность изнашивания этих элементов.

Твёрдые минеральные частицы проникая в цилиндр вместе со всасываемым воздухом, в зазоры между рабочими поверхностями гильзы, поршня и поршневых колец, внедряются в контактную зону, нарушают условия трения и существенно ускоряют абразивный износ сопряжённых элементов.

Мелкодисперсные частицы пыли, размеры которых меньше минимальной толщины масляной плёнки h_{min} , внедряются в зазоры между поршневыми кольцами и цилиндром в процессе возвратно-поступательного движения поршня. При контакте с рабочими поверхностями узла «поршень-поршневое кольцо-цилиндр» такая абразивная среда способствует ускоренному разрушению структуры материалов сопряжённых элементов.

В двигателе внутреннего сгорания, работающем при переменных оборотах и нагрузках, минимальная толщина масляной плёнки h_{min} является величиной изменяющейся во времени. Она определяется вязкостью смазочного масла η , которая зависит от температуры рабочей среды, относительной скорости вращения сопряжённых поверхностей v_w , и обратно пропорциональна приложенной нагрузке N на элементы двигателя.

$$h_{min} = C \cdot \frac{\eta \cdot v_w}{N} \quad (2)$$

где C – коэффициент, учитывающий геометрические размеры и параметры сопрягаемых элементов.

η – динамическая вязкость смазочного материала, Па·с;

v_w – относительная скорость скольжения поверхностей, м/с;

N – нормальная нагрузка в зоне контакта, Н.

Такое соотношение позволяет количественно оценивать динамику изменения толщины смазочной плёнки в различных режимах работы двигателя и прогнозировать условия возникновения граничного смазывания.

На рисунке 3 приведена образование масляной плёнки в паре поршень-поршневые кольца-цилиндр.

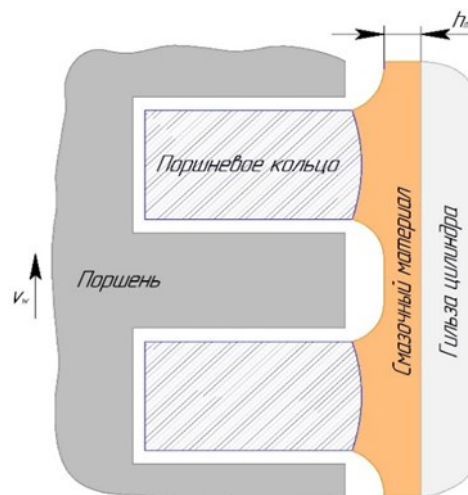


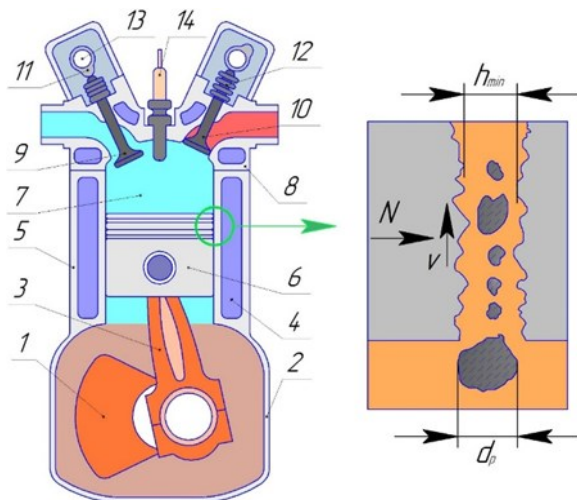
Рис. 3. Образование масляной плёнки в паре: поршень-поршневые кольца-цилиндр.

В стандартных сопряжениях деталей двигателей внутреннего сгорания толщина масляной плёнки изменяется в широком диапазоне из-за переменной нагрузки двигателя, колебаний частоты вращения и температуры масла. В типичных условиях значения минимальной толщины плёнки h_{min} находятся в пределах от 0,5 до 50 мкм.

Абразивный износ возникает в тех случаях, когда в результате увеличения действующей нагрузки N — вызванной ростом механической нагрузки, повышением температуры или снижением вязкости масла — две сопрягаемые поверхности сближаются до минимального расстояния $d_p \geq h_{min}$ (рис. 4). Частицы пыли, как правило, имеют неправильную форму и обладают острыми многогранными кромками. Частицы пыли способны вызывать царапины, формировать борозды и отделять микроскопические металлические фрагменты, которые внедряются в структуру материала элементов, составляющих узел двигателя. В результате колебаний толщины масляной плёнки между сопрягаемыми поверхностями находящиеся в ней пылевые частицы могут разрушаться и дробиться на более мелкие фрагменты. Образовавшиеся мелкие частицы способны проникать в зазоры между поверхностями, где толщина масляной плёнки становится минимальной,

что повышает вероятность абразивного износа.

Схематическая модель зоны взаимодействия узла «поршень-поршневые кольца-цилиндр» с минеральными частицами пыли показана на рисунке 4, из-за минимальной толщины масляной плёнки, возникающей в узлах двигателя, все пылевые частицы размером более 1 мкм способствуют ускоренному абразивному износу элементов. При этом абразивная агрессивность частиц существенно снижается, если их размеры меньше 5 мкм. Частицы пыли менее 1 мкм представляют особую опасность, так как действуют на поверхность цилиндра подобно полирующей пасте, масло плохо удерживается на отполированной поверхности, что нарушает формирование масляной плёнки и ускоряет износ сопряжённых элементов [6].



1 - коленчатый вал, 2 - картер, 3 - шатун, 4 - охлаждающая жидкость, 5 - блок цилиндров, 6 - поршень, 7 - камеры сгорания, 8 - головка блока цилиндров, 9 - впускной клапан, 10 - выпускной клапан, 11 - кулачок, 12 - пружины клапанов, 13 - распредвал, 14 - форсунка (распылитель).

Рис.4. Схематическая модель зоны взаимодействия узла «поршень-поршневые кольца-цилиндр» с минеральными частицами пыли.

Частицы пыли размером более 1 мкм вызывают ускоренный абразивный износ, однако максимальный эффект наблюдается для Частицы пыли размером 7–18 мкм (рис. 5а). Аналогичная зависимость, отражающая износ верхнего поршневого кольца дизельного двигателя, представлена на графике (рис. 5б).

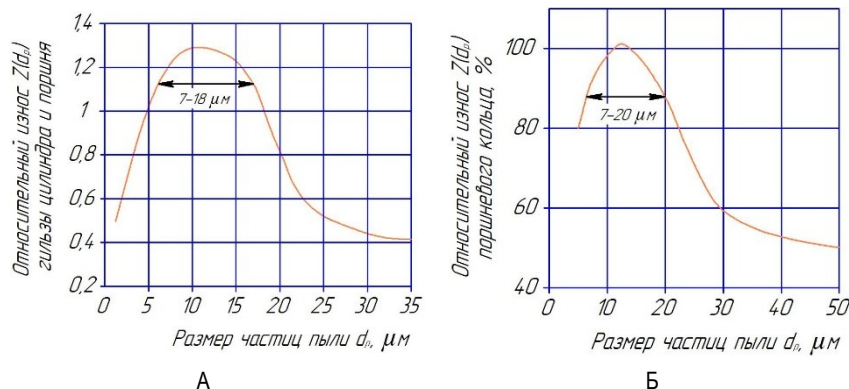


Рис. 5. Влияние размера пыли на относительный износ
А) гильзы цилиндра и поршня, Б) поршневого кольца

Наибольший абразивный эффект для этого кольца отмечен для частиц в диапазоне 7–20 мкм. Пылинки меньших размеров (до 5 мкм) и крупных (свыше 20 мкм) вызывают примерно одинаковый уровень износа, значительно меньший по сравнению с диапазоном 7–20 мкм.

Результаты и обсуждение:

Результаты, изложенные демонстрируют выраженную зависимость интенсивности износа основных трибосопряжений двигателя внутреннего сгорания — коренных и шатунных подшипников, а также маслосъёмного кольца — от гранулометрического состава абразивных включений в смазочном масле.

Износ рабочей поверхности гильзы цилиндра и поршневых колец приводит к нарушению герметичности камеры сгорания, что вызывает утечки сжимаемой рабочей среды. Это, в свою очередь, сопровождается снижением давления в конце такта сжатия, ухудшением условий воспламенения топливовоздушной смеси и уменьшением эффективной мощности двигателя. Одновременно наблюдается рост удельного расхода топлива, обусловленный снижением термодинамической эффективности рабочего цикла.

Увеличение радиальных и осевых зазоров в системе «поршень — поршневые кольца — цилиндр» способствует интенсификации прорыва отработавших газов в картер двигателя. Данный процесс приводит к повышению температуры смазочного масла, ускорению его термоокислительного старения и снижению смазывающих свойств. Кроме того, поток газов вызывает унос масляных паров и капель, что усугубляет расход масла и загрязнение системы выпуска. На рисунке 6 приведены характерные виды износа поверхности цилиндра.

На сегодняшний день практика применения воздушных фильтров в двигателях внутреннего сгорания показывает, что фильтры эффективно задерживают частицы размером до 10 мкм, в то время как более мелкие частицы проходят через фильтр. Кроме того, после каждого цикла очистки способность фильтра удерживать мелкодисперсные частицы уменьшается.

Существует прямая зависимость между размерами пылевых частиц в всасываемом воздухе и степенью износа цилиндров, поршней и поршневых колец. Ниже на рисунке 7 приведена зависимость относительного износа цилиндров, поршней и поршневых колец от размеров пылевых частиц [7;8].

На приведённом графике низкая степень износа, обусловленная крупными частицами, объясняется не их малой абразивной способностью, а эффективностью их удержанием фильтром.

Поршневые кольца работают в условиях предельного трения и считаются крайне чувствительными, поэтому показатели их износа высоки. Также из-за большой контактной поверхности цилиндра абразивный износ здесь также значителен. Низкая степень износа поршня объясняется тем,

что он не полностью контактирует с цилиндром, контакт периодический, что позволяет масляной плёнке восстанавливаться и уносить частицы вместе с маслом [9].

Частицы пыли размером более 1 мкм вызывают абразивный износ, однако наибольшее влияние наблюдается у частиц размером 5–12 мкм.

Анализ влияния загрязнённости воздуха на ресурс двигателя внутреннего сгорания показывает, что увеличение количества пыли снижает срок службы узлов двигателя, а также сокращает ресурс воздушного фильтра, что в итоге приводит к снижению эффективности эксплуатации.



А)



Б)

Рис. 6. Характерные виды износа рабочих поверхностей цилиндра ДВС.

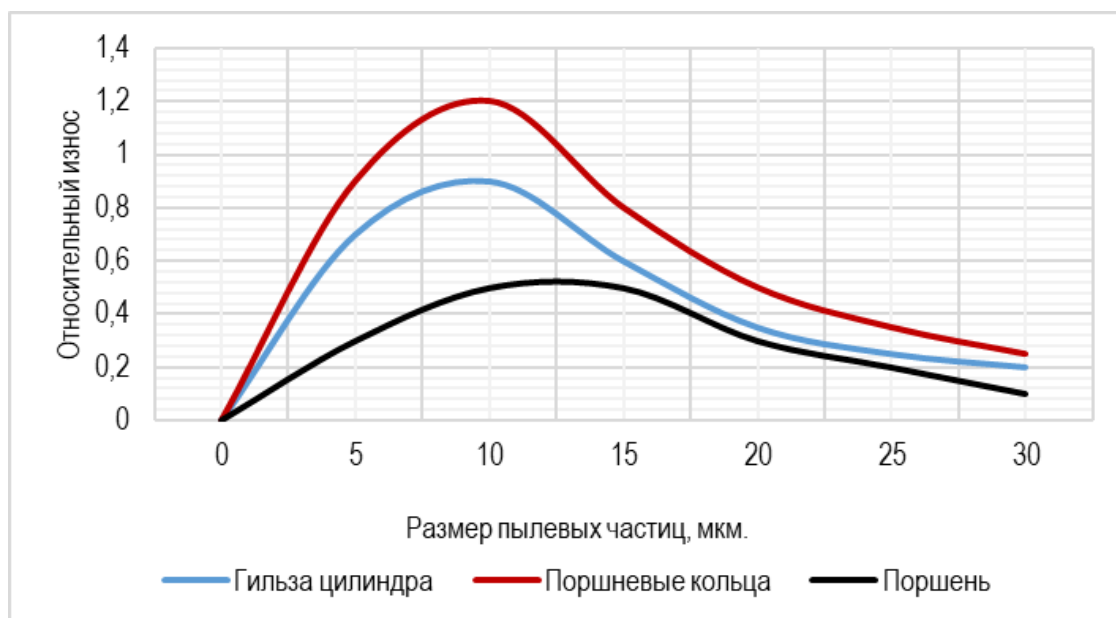


Рис. 7. Зависимость относительного износа от размера частиц пыли.

На приведённом выше графике низкая степень износа, обусловленная крупными частицами, объясняется не их малой абразивной способностью, а эффективным их удержанием фильтром.

Поршневые кольца работают в условиях предельного трения и считаются крайне чувствительными, поэтому показатели их износа высоки. Также из-за большой контактной поверхности цилиндра абразивный износ здесь также значителен. Низкая степень износа поршня объясняется тем, что он не полностью контактирует с цилиндром, контакт периодический, что позволяет масляной плёнке восстанавливаться и уносить частицы вместе с маслом [9].

Частицы пыли размером более 1 мкм вызывают абразивный износ, однако наибольшее влияние наблюдается у частиц размером 5–12 мкм.

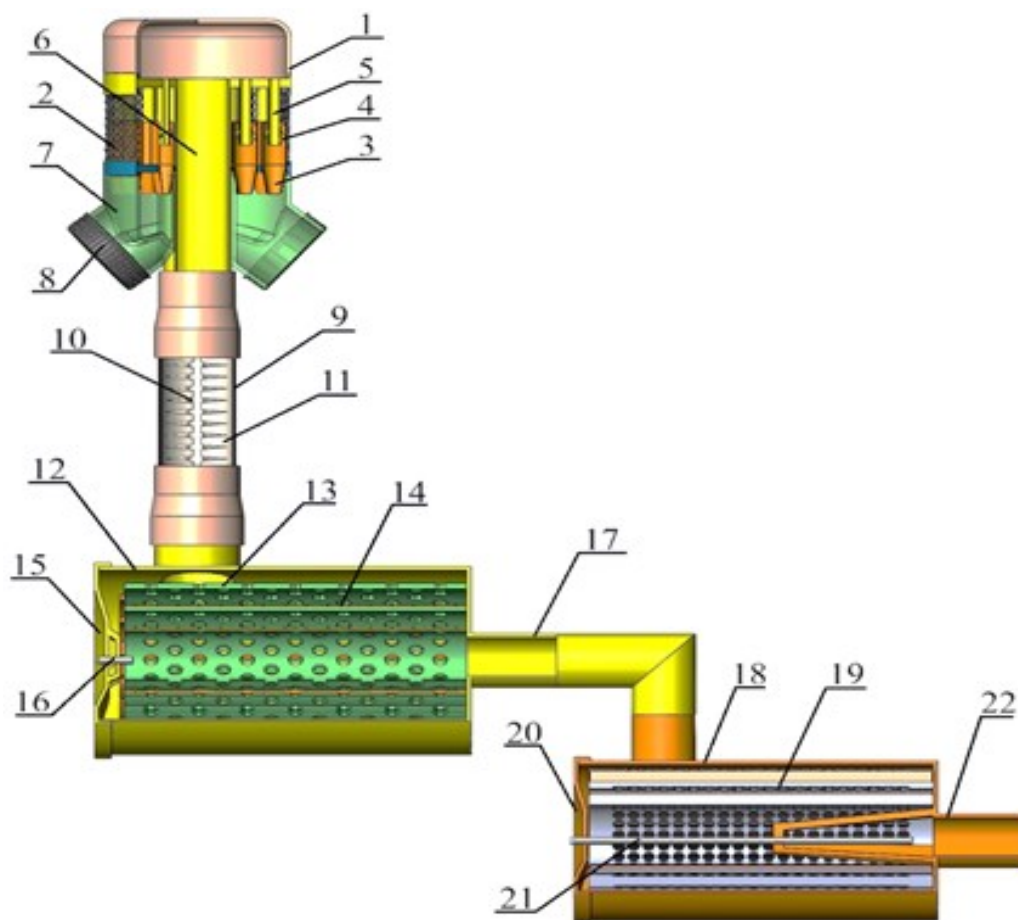
Анализ влияния загрязнённости воздуха на ресурс двигателя внутреннего сгорания показывает, что увеличение количества пыли снижает срок службы узлов двигателя, а также сокращает ресурс воздушного фильтра, что в итоге приводит к снижению

эффективности эксплуатации.

Таким образом, повышение эффективности и надёжности эксплуатации двигателей внутреннего сгорания возможно за счёт совершенствования системы фильтрации воздуха. В этой связи возникает необходимость создания новых инновационных конструкций воздушных фильтров, обеспечивающих эффективную очистку воздуха.

О возможности повышения эффективности фильтрации воздуха ДВС.

В процессе эксплуатации двигателей внутреннего сгорания заполнение воздушного фильтра пылевыми частицами снижает его воздухопроницаемость, то есть сопротивление всасыванию воздуха увеличивается, в результате чего возникают дополнительные потери энергии и чрезмерный выброс выхлопных газов. Частая очистка воздушного фильтра также снижает его фильтрующую способность, так как после каждого цикла очистки поры фильтрующего материала расширяются, и способность задерживать крупные частицы пыли теряется.



1-мультициклонный воздушный фильтр, 2-сетка, 3-циклон, 4-завихритель, 5-труба, 6-всасывающий воздуховод, 7-пылесборник, 8-крышак, 9-корпус первичного электростатического фильтра, 10-игольчатый стержневой электрод, 11-цилиндрическая металлическая труба, 12-корпус конечного электростатического фильтра, 13-электрод в виде металлической пластины, 14- игольчатый стержневой электрод, 15-крышка, 16-стержень, 17-воздуховод, 18- воздушный фильтр, 19-фильтрующий элемент, 20-крышка, 21-стержень, 22-воздухоподводящий трубопровод к двигателю.

Рис. 8. Многоступенчатый комбинированный воздушный фильтр.

С целью повышения эффективности и срока службы воздушного фильтра, а также уменьшения попадания пылевых частиц в двигатель внутреннего сгорания, предлагается устройство многоступенчатой фильтрации воздуха, которое работает на основе первичной очистки в мультициклонных и электростатических фильтрах. На рисунке 8 приведена конструкция многоступенчатого комбинированного воздушного фильтра, предназначенного для применения в двигателях внутреннего сгорания.

Многоступенчатый комбинированный воздушный фильтр работает следующим образом, всасываемый в двигатель воздух сначала проходит через сетки (2) мультициклонного воздушного фильтра (1) и попадает в циклоны (3), где он завихряется с помощью завихрителя (4), и из воздушного потока отделяются крупные частицы пыли, которые собираются в пылесборнике (7). Очищенный воздух через выходной патрубок циклона (5) поступает в двигатель через всасывающий воздуховод (6) в первичный электростатический фильтр (9). В этом фильтре мелкие пылевые частицы воздуха получают первоначальный заряд, часть из них задерживается на стенках цилиндрической трубы (11), а оставшаяся основная масса направляется в конечный электростатический фильтр (12).

Электростатический фильтр работает следующим образом, внутри фильтра (12) расположены электроды (13, 14), к которым подается напряжение. Когда загрязнённый воздух проходит через эту зону, пылевые частицы приобретают электрический заряд. Затем воздушный поток попадает в зону между осадительными электродами (14), один из которых имеет положительный заряд, а другой отрицательный. Под воздействием электрического поля заряженные пылевые частицы отклоняются от воздушного потока и притягиваются к электродам с противоположным зарядом. Частицы оседают на поверхности электродов и удерживаются там за счёт электростатических сил в виде слоя пыли.

Очищенный от мелкой пыли поток воздуха через воздуховод (17) поступает в основной воздушный фильтр (18) и далее подается в цилиндр двигателя внутреннего сгорания.

Выводы

Комбинированный воздушный фильтр на основе **мультициклона и электростатического фильтра** возможно является одной из самых эффективных схем очистки воздуха для ДВС, особенно при работе в **загрязнённых условиях**. Его преимущества проявляются за счёт сочетания **инерционной и электростатической** очистки. Мультициклон эффективно удаляет крупные и средние частицы 8-20 мкм, а электростатический фильтр улавливает мел-

кодисперсные частицы 0,1-2 мкм которые не удерживаются обычными фильтрами, что дает возможность повысить эффективность фильтрации воздуха до 95%.

В мультициклоне очистка происходит без участия фильтрующего материала, за счет центробежных сил, в электростатическом фильтре нет плотной пористой структуры, создающей сопротивление. Поэтому потери давления и гидравлические сопротивления незначительны. При установке таких фильтров перед базовым воздушным фильтром возникающие гидравлические сопротивления снижаются увеличением размеров фильтра и проходного сечения воздухопроводов.

Применение разработанного нами многоступенчатого комбинированного воздушного фильтра позволяет увеличить ресурс базового воздушного фильтра за счет удаления и сбрасывания основной массы пыли мультициклоном, что является актуальным при эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в запыленных условиях, позволяет снизить износ цилиндро-поршневой группы и увеличивает срок службы клапанов и седел. Также, за счет эффективной очистки воздуха обеспечивается полное сгорание топлива, что приводит к снижению удельного расхода топлива.

Библиографический список:

1. Teng, G., Shi, G., & Zhu, J. (2022). Influence of pleated geometry on the pressure drop of filters during dust loading process: Experimental and modelling study. *Scientific Reports*, 12, 20331. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20331>
2. Allam, S., & Mimi Elsaid, A. (2020). Parametric study on vehicle fuel economy and optimization criteria of pleated air filter designs to improve the performance of an I.C. diesel engine: Experimental and CFD approaches. *Separation and Purification Technology*, 241, 116680. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116680>
3. Dziubak, T. (2024). Experimental testing of filter materials for two-stage inlet air systems of internal combustion engines. *Energies*, 17, 2462. <https://doi.org/10.3390/en17112462>
4. Kayumov, U. E., & Pardaeva, Sh. S. (2025). Influence of dust on the operation of internal combustion engines in BELAZ mining dump trucks. *Universum: Technical Sciences*, 2(8), 64–69.
5. Donaldson Company. (n.d.). Engine air cleaners, service parts and accessories. Retrieved from <https://www.donaldson.com/content/dam/donaldson/engine-hydraulics-bulk/catalogs/air-intake/emea/f116005/Air-Intake-Product-Guide.pdf>
6. Seok, J., Chun, K. M., Song, S., & Lee, S. (2015). Study on the filtration behavior of a metal fiber filter as a function of filter pore size and fiber diameter. *Journal of Aerosol Science*, 81, 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2014.11.006>
7. Sun, Z., Liang, Y., He, W., Jiang, F., Song, Q., Tang, M., & Wang, J. (2019). Filtration performance and loading capacity of nano-structured composite filter media for applications with high soot concentrations. *Separation and Purification Technology*, 221, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.03.049>
8. Kayumov, U. E., Pardaeva, S. S., & Akhmedov, A. S. (2025). Comprehensive analysis of technological and operational factors contributing to elevated diesel fuel consumption in BELAZ dump trucks operating in open-pit mining conditions. *Modern Education and Development*, 26(5), 154–158.
9. Pardaeva, S., Kayumov, U., & Kaxharov, O. (2025). Analysis of factors influencing the increased consumption of diesel fuel by BELAZ dump trucks in a quarry. *Scientific and Technical Journal of Namangan Institute of Engineering and Technology*, 10(1), 237–243.