

with the classical method of a calibrated starter using the correlation of electric starter shaft torque while motoring the crankshaft with the diesel engine torque. Some standard motor oils viscosity-temperature characteristics regression dependences in the range of starting temperatures and the empirical torque dependence on the oil kinematic viscosity are determined. As a result, a table of equivalent cold start temperatures was created using variable loads during HSSDDE startup. On the basis of the results of the experiment the theoretically calculated values of equivalent cold start temperatures for other oils used in the operation of HSSDDE are given. Specified range of variation of the cold start equivalent temperature factor for further polyfactorial investigation of the HSSDDE start process, which will take values of 0 °C, 5 °C and 10 °C.

Key words: crankshaft motoring torque; diesel engine cold start; equivalent cold start temperature; motoring the crankshaft.

УДК 621.432.3

DOI: 10.20998/0419-8719.2020.2.10

А.Э. Хрулев, С.А. Дмитриев

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ ВПУСКА НА ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕ ПЫЛИ И ИЗНОС ДЕТАЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ДВС

В условиях жестких ограничений, накладываемых на конструкцию ДВС экономическими и экологическими требованиями, имеется риск нештатного и незапланированного снижения ресурса ДВС вследствие повышенного абразивного износа. В соответствии с этим цель работы сформулирована как исследование типовых конструкторских решений впускных каналов ДВС с точки зрения их влияния на абразивный износ деталей. При определении возможных источников абразивных частиц было выявлено, что получившие широкое распространение воздушные фильтры из волокнистых материалов обладают свойством пропуска пыли при сильном загрязнении. В связи с этим для типового элемента впускного канала была разработана методика расчета криволинейного движения частицы по линии тока воздуха с учетом действующих сил вблизи бокового отвода из канала. Расчет с допущением о движении воздуха по радиусу показал, что в результате центрифугирования частица пыли отклоняется от линии тока воздуха и переходит на больший радиус тем сильнее, чем больше ее размер и скорость воздуха. Оценка достоверности результатов расчета выполнена путем численного моделирования двухфазного течения с помощью программного комплекса ANSYS. Получено совпадение результатов расчета движения частицы с результатами моделирования в диапазоне наиболее разрушительных при абразивном износе размеров частиц 10-20 мкм с точностью не хуже +20%. Сравнение результатов расчета и моделирования с опытными данными выполненных исследований причин неисправностей ДВС подтвердило, что во впускной системе за счет неравномерного распределения частиц может возникнуть локальный абразивный износ в одном или нескольких цилиндрах. На основании полученных результатов сформулированы рекомендации по повышению надежности и ресурса ДВС в эксплуатации, включая необходимость не только учета процессов центрифугирования пыли при проектировании, но и возможного уточнения регламентов обслуживания уже существующих ДВС.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания; абразивный износ; впускной коллектор; частица; инерция; центрифугирование.

Постановка проблемы

Известно, что абразивный износ является одним из главных факторов, определяющих надежность и ресурс всех типов ДВС в эксплуатации [1,2]. Влияние абразивного износа на техническое состояние двигателей в эксплуатации подтверждается известным фактом – на протяжении многих десятилетий значительные усилия конструкторов и исследователей были направлены на решение комплекса проблем, связанных с абразивным изнашиванием деталей и узлов, включая не только разработку мероприятий по снижению поступления абразивных частиц к парам трения, но и по уменьшению воздействия этих частиц на трущиеся поверхности [3,4].

И действительно, за долгие годы все основные закономерности абразивного износа пар трения применительно к двигателям внутреннего сгорания были достаточно подробно изучены, в том

числе, в рамках фундаментальной научной дисциплины, исследующей трение и износ – трибологии [5,6]. В результате исследований практически не осталось "белых пятен" в процессах, связанных с абразивным износом деталей ДВС. Так, были разработаны вполне конкретные и исчерпывающие рекомендации как по выявлению (диагностике), так и по предотвращению абразивного износа [7]. Это касается комплекса соответствующих мероприятий, начиная от конструктивных, осуществляемых при проектировании и создании новых образцов с целью организации эффективной очистки воздуха, масла, рабочих жидкостей от абразивных частиц, и технологических, включая обеспечение износостойкости деталей и узлов [8]. Далее мероприятия продолжают в эксплуатации, что включает приемы и принципы надлежащей эксплуатации транспортных средств, позволяющие ограничить поступление абразива в двигатель, своевременную и

правильную диагностику технического состояния, определяемого абразивным изнашиванием, а также правильные технологии обслуживания и ремонта по выявлению и устранению последствий воздействия абразивных частиц [9,10].

С другой стороны, необходимо отметить, что развитие ДВС, как одного из основных типов двигателей транспортных средств различного назначения продолжается в настоящее время в условиях жестких ограничений, накладываемых экономическими и экологическими требованиями [11,12]. В соответствии с этим, конструкции ДВС достаточно быстро эволюционируют в направлении удовлетворения все новых экономических правил и экологических стандартов.

В то же время, следует отметить, что хорошо изученные ранее закономерности с точки зрения противодействия абразивному износу могут оказаться не вполне соответствующими принципам, закладываемым при проектировании новых ДВС в конкретную современную конструкцию, поскольку такие закономерности, как правило, получены при других условиях и для других конструкций. Указанное противоречие между хорошо изученными трибологическими характеристиками ДВС старых конструкций и современными экономическими и экологическими требованиями, которым старые конструкции в общем случае могут не удовлетворять, несет риск нештатного и незапланированного снижения ресурса новых ДВС вследствие повышенного абразивного износа.

В соответствии с этим целью данной работы является исследование типовых конструкторских решений современных ДВС с точки зрения их влияния на абразивный износ деталей, а также выработка с учетом полученных результатов рекомендаций по повышению ресурса ДВС.

Некоторые особенности очистки воздуха в современных ДВС

Чтобы определить возможные источники абразивных частиц, необходимо рассмотреть конструкцию современных воздушных фильтров. Логично предположить, что воздушный фильтр должен практически полностью или, по крайней мере, с некоей максимально возможной эффективностью, очищать от абразивных частиц воздух, поступающий в двигатель. И действительно, в двигателях прошлых лет выпуска получили безусловное распространение бумажные фильтры [13,14], работа которых основана на механизме непосредственного задержания частиц пыли (так называемого эффекта "сита") – когда вылавливаются и задерживаются все частицы, которые больше размера пор или расстояния между волокнами в фильтре (рис. 1).

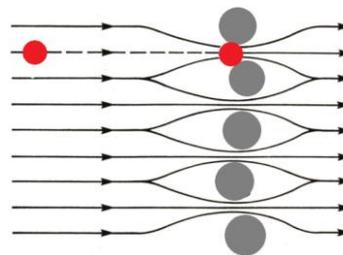


Рис.1. Схема непосредственного задержания частиц больше заданного размера порами материала (эффект сита)

Понятно, что если в начальный период фильтр задерживает все частицы пыли с размером больше заданного, то по мере загрязнения размер задерживаемых фильтром частиц будет уменьшаться. В результате по мере загрязнения основные характеристики бумажного воздушного фильтра – эффективность очистки и тонкость отсева – возрастают, что в целом и обеспечивает высокое качество очистки воздуха в эксплуатации.

Тем не менее, из этого полезного свойства бумажных фильтров вытекают и недостатки – сравнительно небольшая грязеемкость и быстрый рост гидравлического сопротивления по мере загрязнения [15]. Понятно, что рост сопротивления приводит не только к уменьшению количества поступающего воздуха, но и к ухудшению мощностных и экологических характеристик.

Именно эти недостатки при повышении экологических требований и привели к постепенной замене традиционных бумажных воздушных фильтров на фильтры из так называемого "нетканного" синтетического волокна с нефиксированными порами (рис. 2).

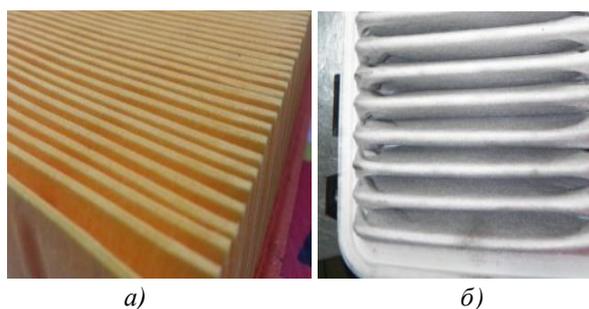


Рис. 2. Воздушные фильтры: а) традиционный бумажный; б) нетканый волокнистый

Основное отличие волокнистых фильтров от бумажных состоит в том, что для фильтрации частицы не обязательно застревать в волокнах – если она просто коснулась фильтровального материала, этого уже достаточно для эффективного осаждения. В результате эффективная фильтрация проис-

ходит при расстоянии между волокнами, значительно превышающем размеры частиц [16]. Такие свойства волокнистых фильтров связаны с несколькими процессами, в том числе, с адгезией, диффузией, инерцией (рис. 3) и другими эффектами [9,13,17].

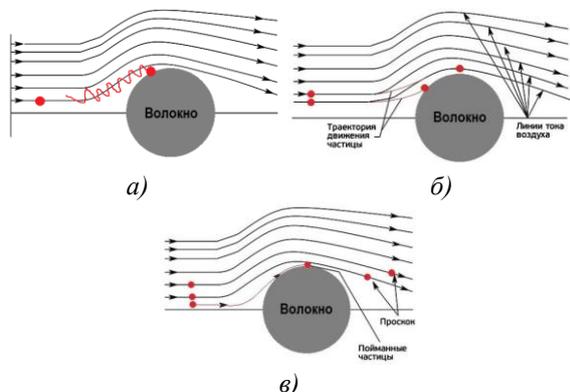


Рис.3. Основные эффекты, на которых основана работа современных волокнистых фильтров: а) диффузии; б) инерции; в) зацепления

Поскольку частицы пыли не закупоривают поры, а налипают на волокнах [17,18], заметного засорения волокнистого фильтра со временем не происходит, и проходные сечения между волокнами остаются в той или иной степени свободными (рис.4). Соответственно, не происходит и заметного роста гидравлического сопротивления фильтра в эксплуатации по мере загрязнения, а его влияние на работу двигателя остается минимальным.

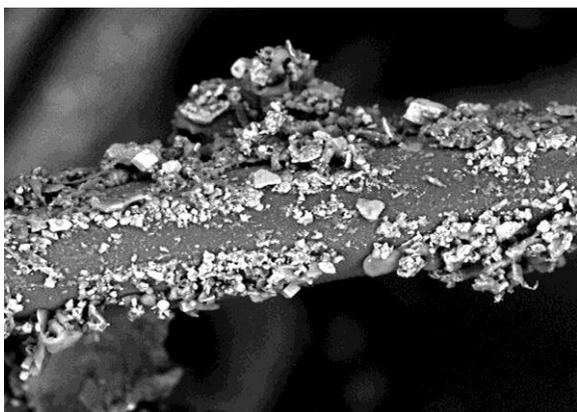


Рис.4. Частицы, задержанные на поверхности волокон при загрязнении фильтра [17]

Несмотря на указанные преимущества волокнистых воздушных фильтров, со временем эксплуатации проявляются и их недостатки – когда волокна сильно загрязняются осевшими на них частицами (рис.4), они теряют способность удержи-

вать абразив с помощью описанных выше эффектов. Кроме того, при некоторых условиях (например, при механическом воздействии) волокна могут сбрасывать накопившиеся частицы в фильтруемый воздух. Все эти особенности волокнистых фильтров обуславливают постепенное увеличение пропускаемого все большего и большего количества абразивных частиц в двигатель.

Таким образом, если у бумажных воздушных фильтров со временем наблюдалось повышение эффективности очистки при увеличении сопротивления с одновременным ухудшением характеристик двигателя, то у современных волокнистых фильтров следует выделить постепенное ухудшение эффективности очистки как главную особенность (рис.5).

В результате отсутствие явно видимых внешних признаков загрязнения и продолжение эксплуатации двигателя с загрязненным воздушным фильтром может привести к абразивному износу и заметному снижению ресурса.

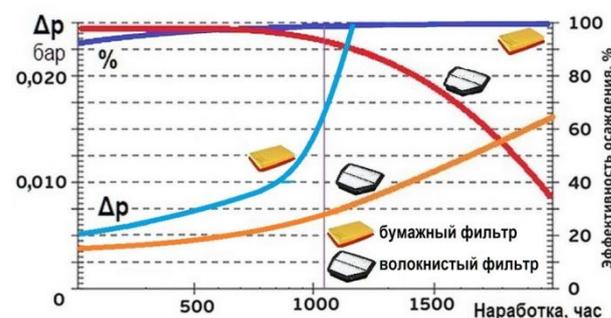


Рис.5. Сравнение волокнистого фильтра с бумажным по перепаду давления Δp и эффективности фильтрации (%) в процессе эксплуатации

Тем не менее, на данном этапе представляется важным проанализировать не столько подверженность деталей двигателя абразивному износу (она в целом подробно изучена), сколько способность различных элементов конструкции оказывать влияние на абразивный износ деталей и снижение ресурса двигателя. При этом необходимо учесть, что многие конструкции двигателей, а также принципы их конструирования [3,4,8], остаются неизменными многие десятилетия, в то время как массовое внедрение волокнистых фильтров произошло сравнительно недавно, 10-15 лет назад. Это означает, что простой переход с бумажных фильтров на волокнистые, при неизменной конструкции двигателя, может стать причиной новых неисправностей, которых ранее не встречалось и не описывалось.

Критические элементы конструкции впускной системы ДВС

Из указанных принципов работы волокнистых воздушных фильтров следует, что начиная с некоторого момента времени во впускную систему будет попадать все большее количество абразивных частиц, которые не будут задержаны фильтром.

Известно, что абразивные частицы в диапазоне размеров 5-30 мкм вызывают абразивный износ пар трения, причем размер 10-20 мкм является наиболее разрушительным для деталей двигателей [9]. Однако остается открытым вопрос, на какие процессы во впускной системе могут повлиять частицы из указанного диапазона, если их количество в эксплуатации будет не уменьшаться, как это происходило ранее с бумажными фильтрами, а увеличиваться?

Очевидно, что любая частица, обладая массой, при изменении направления движения воздушного потока может отставать от линий тока в результате действия сил инерции. В таком случае следует ожидать перераспределения частиц по сечению канала при повороте потока – частицы по инерции будут вытеснены в сторону большего радиуса, т.е. произойдет центрифугирование частиц.

Нетрудно предположить, что этот эффект будет наиболее выражен при наличии у канала боковых ответвлений, когда следует ожидать распределения частиц в пользу прямолинейного движения, поскольку отклонению частиц от прямолинейного движения препятствует инерция.

И действительно, такие элементы конструкции, в которых возможно центрифугирование абразивных частиц, довольно широко применяются во впускных системах современных ДВС – это различные распределительные патрубки для подачи воздуха по рядам цилиндров, а также коллекторы с трубопроводами подачи воздуха непосредственно к цилиндрам (рис.6).



Рис.6. Впускной коллектор ДВС – типичная система, в которой можно предположить наличие центрифугирования частиц пыли при повороте воздуха в боковые отводы

Можно предположить, что наибольший эффект от центрифугирования частиц следует ожидать при резких поворотах потока с малыми радиусами закругления. При соответствующих допущениях это можно рассчитать.

Математическая модель движения частицы по криволинейной траектории

С целью определения возможных неисправностей, вызванных центрифугированием частиц пыли, было рассмотрено движение одиночной частицы по криволинейной траектории (рис.7) вблизи бокового отвода из канала в виде тройника, который встречается в конструкции воздухопроводов двигателей различных типов. Как это следует из [19], при близком значении расходов воздуха в прямом и боковом трубопроводах линии тока вблизи отвода ограничены радиусом, близким по величине к ширине (диаметру) бокового канала с центром в угловой точке (рис.8).

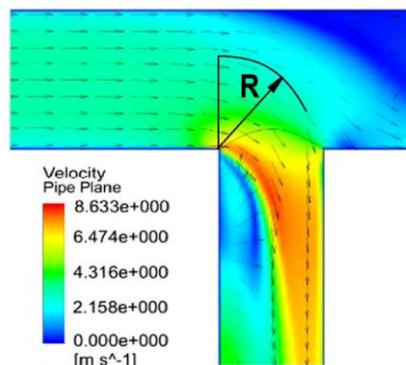


Рис.7. Визуализация течения при разветвлении потока с условием примерного равенства расходов воздуха в прямом и боковом каналах [19] – область поворота потока ограничена радиусом, близким к диаметру бокового канала

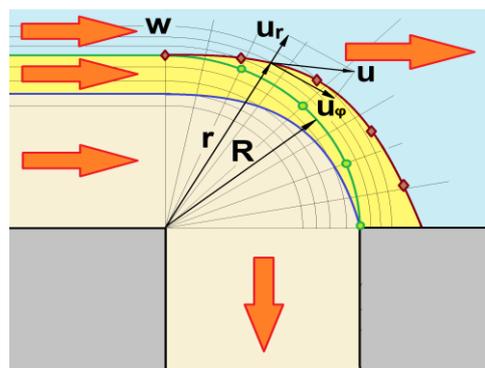


Рис.8. Схема движения частицы пыли по радиусу – за счет инерции частица переходит на больший радиус и может "проскочить" поворот в отвод

Движение частицы массой m , зависящей от диаметра d и плотности ρ_p частицы (пыль состоит,

главным образом, из кварца, который имеет плотность $\rho_p = 2700 \text{ кг/м}^3$, в потоке воздуха подчиняется второму закону Ньютона, согласно которому ускорение определяется действием большого числа различных сил F_i [20], в том числе, тяжести, центробежной, Архимеда (выталкивания), аэродинамического сопротивления, Кориолиса, Бассе (связанной с предысторией движения), Саффмена (подъемной), Магнуса (при вращении), что в векторной форме записывается как [21]:

$$m \frac{d\vec{u}}{d\tau} = \sum_i \vec{F}_i \quad (1)$$

Уравнение (1) показывает: если масса частицы пренебрежимо мала, то частица движется строго по линиям тока воздуха.

Однако когда масса частицы растет, частица может отставать от линий тока под действием сил инерции (центрифугироваться). В таком случае требуется определить отклонение частицы от линии тока воздуха по радиусу при различных скоростях потока, углах отвода и размерах частиц.

Для вывода расчетных уравнений были приняты следующие упрощающие допущения:

- 1) сила тяжести отсутствует (малый размер частиц, высокая скорость),
- 2) поток воздуха стационарный, движется с постоянной скоростью w на радиусе R ,
- 3) параметры потока в поперечном направлении (ось z) неизменны,
- 4) соударение частиц со стенками и между собой отсутствует.

Если рассмотреть задачу в полярных координатах и упростить ее, а именно, пренебречь в первом приближении силами тяжести и положить параметры в направлении, перпендикулярном плоскости движения частицы неизменными, то из уравнения (1) можно получить систему уравнений для радиального (по радиусу r) и окружного (по углу поворота φ) ускорения частицы:

$$\begin{cases} m \frac{du_r}{d\tau} = F_{A\varphi} + F_{C_r} \\ m \frac{du_\varphi}{d\tau} = F_k + F_{C_\varphi} \end{cases} \quad (2)$$

где u_r , u_φ – радиальная и окружная составляющие скорости частицы, $F_{A\varphi}$ – сила Архимеда (выталкивающая), F_k – Кориолисова сила, F_{C_r} и F_{C_φ} – составляющие результирующей силы аэродинамического сопротивления

$$\vec{F}_C = -C_D \rho \frac{\pi d^2}{8} \vec{u} \quad (3)$$

где ρ – плотность воздуха.

Коэффициент аэродинамического сопротивления C_D , входящий в формулу (3), можно определить с помощью одной из формул для сферы. Например, при числе Рейнольдса в диапазоне $0,01 < Re < 700$ справедлива формула Клячко [21,22]

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}$$

Число Рейнольдса, определяемое по скорости частицы относительно воздуха, может быть рассчитано по окружной составляющей скорости частицы, если радиальная скорость мала:

$$Re = \rho \frac{|\vec{w} - \vec{u}|}{\mu} d = \rho \frac{|w - u_\varphi|}{\mu} d \quad (4)$$

Теперь можно расписать все силы, входящие в систему уравнений (2). Так, радиальная и окружная составляющие силы аэродинамического сопротивления могут быть записаны в виде:

$$F_{C_r} = -C_D \rho \frac{\pi d^2}{8} u_r \sqrt{u_r^2 + (w - u_\varphi)^2} \quad (5)$$

$$F_{C_\varphi} = -C_D \rho \frac{\pi d^2}{8} (u_\varphi - w) \sqrt{u_r^2 + (w - u_\varphi)^2}$$

а силы Архимеда (выталкивания, центробежная) и Кориолиса [22]:

$$F_{A\varphi} = \frac{m_p u_\varphi^2 - \rho V_p w^2}{r}, \quad F_k = -m_p \frac{u_\varphi u_r}{r} = -\rho_p V_p \frac{u_\varphi u_r}{r} \quad (6)$$

Таким образом, подстановкой всех составляющих сил в систему уравнений (2) можно получить систему из двух уравнений для расчета радиального и окружного ускорения частицы в виде:

$$\begin{cases} \frac{du_r}{d\tau} = \frac{1}{r} \left(u_\varphi^2 - \frac{\rho}{\rho_p} w^2 \right) - \frac{3}{4} C_D \frac{\rho u_r}{\rho_p d} \sqrt{u_r^2 + (w - u_\varphi)^2} \\ \frac{du_\varphi}{d\tau} = -\frac{u_\varphi u_r}{r} + \frac{3}{4} C_D \frac{\rho (w - u_\varphi)}{\rho_p d} \sqrt{u_r^2 + (w - u_\varphi)^2} \end{cases} \quad (7)$$

Система (7) решается численно с начальными условиями: $\tau=0$, $\varphi=0$, $r=R$, $u_\varphi=w$, $u_r=0$ для заданного радиуса R и скорости течения воздуха w при заданном размере частицы d . Решением являются составляющие скорости частицы u_φ и u_r , а также траектория движения частицы, определяемая с шагом по времени $\Delta\tau$ текущим углом φ и текущим радиусом r , по формулам:

$$u_r = u_r + \frac{du_r}{d\tau} \Delta\tau, \quad u_\varphi = u_\varphi + \frac{du_\varphi}{d\tau} \Delta\tau,$$

$$\varphi = \varphi + \frac{360}{2\pi r} u_\varphi \Delta\tau, \quad r = r + u_r \Delta\tau, \quad \tau = \tau + \Delta\tau.$$

Это позволяет рассчитать текущее отклонение (отставание) частицы от линии тока воздуха по углу и радиусу:

$$\Delta\varphi = \varphi - \frac{180w}{\pi R} \tau, \quad \Delta r = r - R.$$

Для практической цели исследования важна не столько траектория, сколько распределение частиц по каналам. То есть, необходимо определить, сколько частиц проскочит боковой отвод при повороте потока за счет центрифугирования. С этой целью в первом приближении при условии малых отклонений частицы от кругового движения было принято простое соотношение для траектории частицы (рис. 8) – если в конце поворота потока наблюдается уход частицы на радиус, больший радиуса R на величину ΔR , то можно принять, что такая частица попала бы на край бокового канала в том случае, если она начнет криволинейное движение на начальном радиусе, который меньше R на ту же величину ΔR .

При равенстве расходов воздуха через прямой канал и боковой отвод в идеальном случае, когда частицы не отстают от линий тока (например, при малом размере частиц и/или малой скорости воздуха), количество частиц N_r , поступающих в боковой отвод, и количество частиц N_{ex} , проходящих прямо, одинаково и равно в сумме количеству частиц N_{in} на входе в трубу:

$$N_{ex} = N_r = 0,5N_{in}.$$

В случае, когда за счет инерции частица уходит на больший радиус и может не попасть в боковой отвод, начало линии тока, соответствующей внешней границе поворачивающегося потока, будет расположено приблизительно в средней части трубы (рис.7). Тогда отклонение количества частиц в боковом отводе от половины общего количества можно приближенно положить пропорциональным изменению радиуса.

Следовательно, количество частиц в боковом отводе N_r будет меньше, чем исходная половина от частиц на входе N_{in} , пропорционально величине ΔR , что можно приближенно записать как

$$N_r = \frac{N_{in}}{2} \left(1 - \frac{\Delta R}{R} \right). \quad (8)$$

Отсюда следует, что относительное (отнесенное к числу частиц на входе) количество частиц, прошедших прямо по трубе, будет приближенно равно:

$$\bar{N} = \frac{N_{ex}}{N_{in}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\Delta R}{R} \right). \quad (9)$$

Результаты расчета распределения частиц пыли при центрифугировании

Расчет относительного количества частиц на выходе из прямого канала к количеству частиц на входе в канал был выполнен при угле поворота потока в отводе 90° для частиц разных размеров в диапазоне 5-30 мкм и при разных скоростях воздуха. Поскольку скорость воздуха пропорциональна

режиму работы двигателя при заданном сечении каналов и объеме цилиндров (в качестве примера рассмотрен малолитражный двигатель объемом 1,2 л с диаметром каналов 40 мм), исследованный диапазон скорости воздуха $w = 5-20$ м/с примерно соответствует диапазону режимов работы двигателя $n = 1000-6000$ мин⁻¹ при полной нагрузке.

Действительно, если положить, что через боковой отвод диаметром D питается цилиндр двигателя объемом V_h , то можно записать уравнение расхода в виде:

$$\rho w F = \mu_v V_h \frac{n}{60},$$

где μ_v – коэффициент наполнения (в 1-м приближении принят неизменным и равным 1), откуда получается приблизительная связь скорости воздуха с частотой вращения в виде $n = 300w$, что было использовано ниже для иллюстрации результатов расчета.

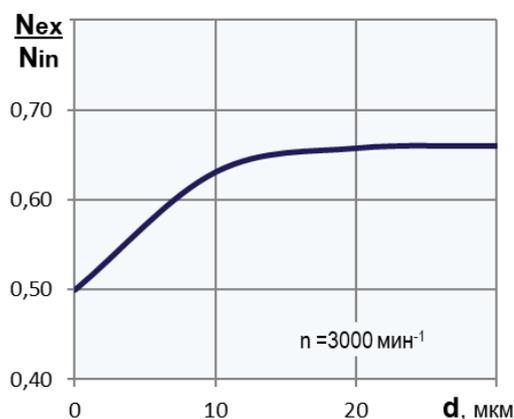


Рис.9. Расчетное влияние размера частиц пыли на их перераспределение в сторону прямого канала

Влияние размера частиц на их центрифугирование хорошо иллюстрирует рис. 9, где можно видеть зависимость отношения количества частиц на выходе N_{ex} к общему количеству частиц на входе N_{in} и режиму работы двигателя 3000 мин⁻¹ от размера частиц.

Расчет дает вполне ожидаемый результат – увеличение размера приводит ко все большему "проскакиванию" частиц по инерции мимо бокового отвода. В результате чего в прямой канал будет проходить пыли до 65%, в то время как в боковой отвод почти вдвое меньше - только 35%.

На рис. 10 представлены результаты расчета относительного количества частиц в прямом канале на разных режимах (при разной скорости воздуха) для частиц разных размеров.

Хорошо видно, что при увеличении размера частиц и скорости потока (частоты вращения коленвала) количество "проскочивших" поворот частиц увеличивается, что приводит к уменьшению

относительного количества пыли, попадающей в отвод, и, соответственно, к увеличению количества пыли в прямом канале до тех же 65–70 % от общего количества пыли на входе.

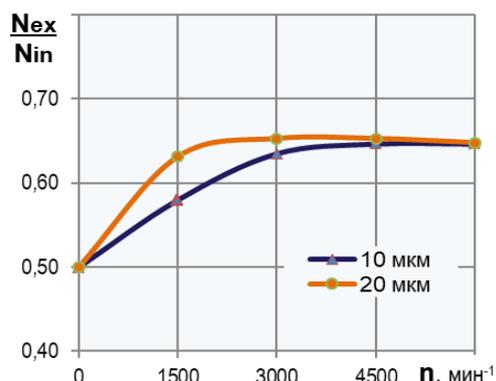


Рис. 10. Влияние режима работы двигателя на перераспределение частиц пыли разного размера за счет их центрифугирования

Таким образом, в воздуховоде с боковым отводом пыль перераспределяется так, что при условии одинакового расхода воздуха в прямой канал будет направлено тем больше пыли, чем больше размер частиц и скорость потока (частота вращения коленвала).

Оценка достоверности результатов расчета сравнением с результатами численного моделирования двухфазного течения

Поскольку исследований данной особенности перераспределения пыли во впускных каналах ДВС в известных источниках найти не удалось, было принято целесообразным оценить достоверность полученных результатов. С этой целью было выполнено численное моделирование 2-фазного течения (воздух с частицами) с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

Моделирование проводилось с помощью программного комплекса ANSYS в версии Student [23] в несколько этапов [24]. Для моделирования был взят тот же участок канала с боковым отводом (рис.8), для которого выше были получены предварительные данные по распределению частиц пыли, при этом длина всех участков от разветвления была принята одинаковой и кратной пяти диаметрам.

Для построения конечно-элементной сетки был задан размер элемента области течения, равный 4 мм, после чего вся область разбивалась на элементы с таким размером. Далее было задано количество слоев пограничного слоя (12), затем были получены размеры элементов пограничного слоя из условия увеличения их толщины от начальной (минимальной) с коэффициентом 1,2. После этого была сгенерирована сетка с 168267 элементами (рис.11).

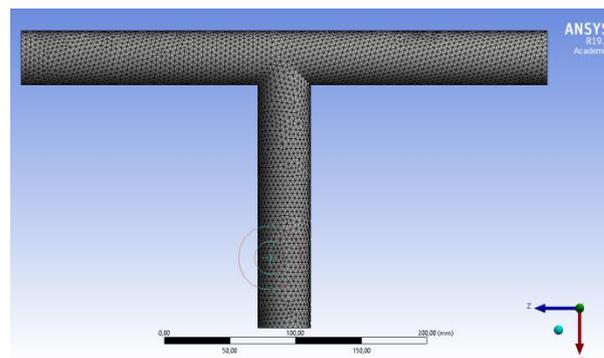


Рис. 11. Конечно-элементная модель области течения с разветвлением потока

Модель расчета создавалась в стандартном модуле Fluent программного комплекса ANSYS, что подразумевало: выбор материала (в задаче их два: воздух и частицы пыли), выбор модели течения, задание граничных условий, настройки расчетного модуля (решателя).

Если на входе в трубу граничные условия задать довольно просто, то в выходных сечениях труб граничные условия, а именно, давления, неизвестны. Поэтому в качестве первого приближения проводился расчет только течения воздуха без учета частиц песка. Считать 2-фазное течение воздуха с пылью сразу нельзя именно по этой причине.

В расчете течения воздуха была задана стандартная к-е модель турбулентности [25]. В качестве граничных условий на входе задавалась скорость течения воздуха (те же значения в диапазоне 5-20 м/с), которая принята одинаковой по входному сечению и направленной к нему по нормали. Массовый расход воздуха на входе рассчитывался по скорости, площади, давлению и температуре, после чего на каждом выходе было установлено по половине общего массового расхода (поскольку два отвода приняты равноценными).

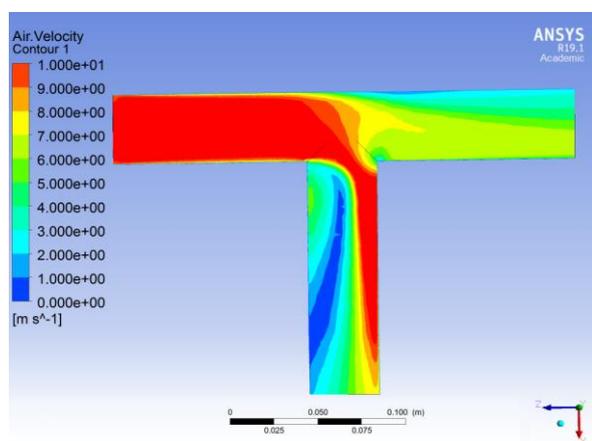
В результате расчета были получены поля давлений, скоростей, температур, а также линии тока воздуха (рис.12). Помимо этого, определялись осредненные значения параметров воздуха в сечениях, в том числе, давлений на входе и выходе, с помощью встроенных функций программы.

Следующий этап расчета – добавление модели двухфазного течения – выполнен с помощью расчетного модуля Eulerian. В качестве граничных условий на выходе для этой модели задается только давление, полученное при расчете течения воздуха.

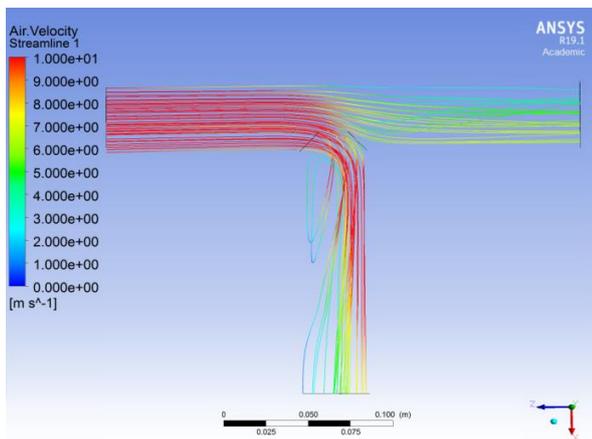
Полная модель Eulerian позволяет рассчитывать дисперсные течения. В рассматриваемом слу-

чае имеются две фазы: воздух и частицы пыли, которые считаются взаимопроницаемыми. В рамках данной модели решается свой набор уравнений сохранения для каждой фазы, где взаимодействие фаз описывается дополнительными слагаемыми в уравнениях сохранения. При этом для твердой дисперсной фазы использовался специальный вариант модели – Eulerian Granular.

В результате задача решается еще раз, уже во 2-м приближении, для которого заданы следующие граничные условия для воздуха: на входе – скорость, а на выходе – давление, полученное на 1-м этапе расчета. Для частиц пыли на входе задается их размер и массовый расход (скорость частиц на входе принималась равной скорости воздуха).



а)



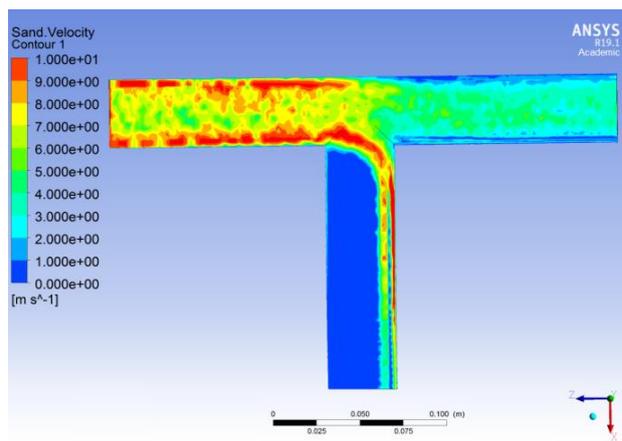
б)

Рис.12. Поля скоростей (а) и линии тока (б) воздуха в разветвляющемся канале при скорости на входе 10 м/с и равенстве расходов на выходе

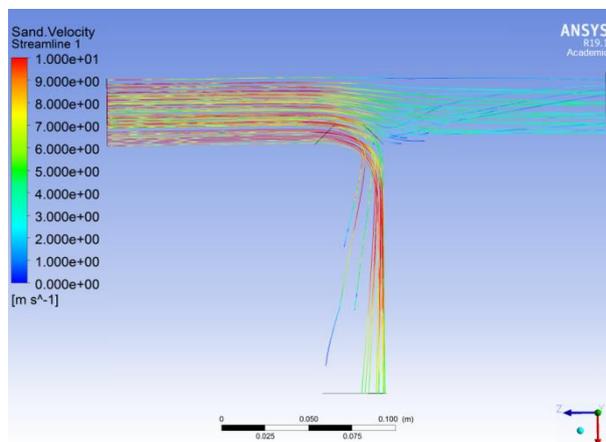
В результате расчета (рис.13) определяются траектории движения частиц пыли, а с помощью встроенной функции расчетного модуля – количество частиц и их скорость (массовый расход пыли),

а также уточненные расходы воздуха в прямом и боковом отводе.

Полученные данные моделирования 2-фазного течения в диапазоне скоростей воздуха 5-20 м/с при размере частиц 5-30 мкм показывают, что частицы малого размера (порядка 5 мкм и меньше) движутся по линиям тока воздуха и не обнаруживают центрифугирования при повороте потока в боковой отвод. В то же время чем больше размер частиц и скорость воздуха, тем больше частиц не попадает в боковой отвод, "проскакивая" по инерции прямо по трубе.



а)



б)

Рис.13. Поля скоростей (а) и траектории (б) частиц размером 10 мкм в воздухе, движение которого представлено на рис.12

Этот вывод совпадает со сделанным выше по результатам расчета движения частицы по радиусу, в том числе, и по количественным данным о перераспределении частиц (рис.14). Действительно, можно отметить совпадение в целом результатов расчета по "радиусной" методике с результатами

моделирования в диапазоне наиболее разрушительных при абразивном износе размеров частиц 10-20 мкм с точностью не хуже $\pm 20\%$.

Ошибка методики, очевидно, связана с принятыми в ней допущениями, главным образом, о движении воздуха по неизменному радиусу. Тем не менее, даже в упрощенном виде методика позволяет сделать то, что не дают никакие методы и средства диагностики ДВС [2,26] – объяснить характер повреждений и установить причину неисправности при некоторых видах абразивного износа.

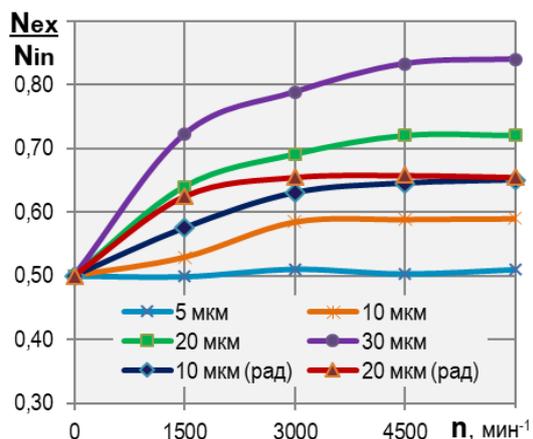


Рис.14. Результаты моделирования 2-фазного течения в сравнении с результатами расчета движения частиц по радиусу (рад) в зависимости от режима работы двигателя для различных размеров частиц пыли

Сравнение результатов расчета и моделирования с опытными данными

Практика показывает, что специфический абразивный износ вследствие центрифугирования пыли в разветвляющихся каналах обнаруживается в реальных конструкциях ДВС [3,6]. Особенно сильно такой износ проявляется даже при незначительных нарушениях регламента обслуживания двигателя и несвоевременной замене воздушного фильтра.



Рис.15. Патрубок с разветвлением потока от воздушного фильтра к турбокомпрессорам правого и левого ряда цилиндров V-образного дизеля

К каналам данного типа можно отнести, к примеру, патрубков подачи воздуха от воздушного фильтра V-образного ДВС с наддувом (рис.15).

На рис. 16 хорошо виден результат применения данного патрубка в конструкции ДВС – входные кромки лопаток турбокомпрессора, получавшего воздух из дальнего (от воздушного фильтра) канала патрубка, сильно повреждены в результате газоабразивного износа, в то время как лопатки компрессора, питаемого воздухом через боковой отвод, практически не имеют износа.



Рис.16. Избирательный газоабразивный износ входных кромок лопаток одного турбокомпрессора из двух за 42000 км пробега автомобиля [9]

Учитывая, что в исследуемом случае применялся волокнистый воздушный фильтр, его сочетание с патрубком, имеющим очевидное и совершенно безобидное, на первый взгляд, конструктивное исполнение, фактически получилось малопригодно для двигателя в реальных условиях эксплуатации – ресурс оказался в несколько раз снижен не только у одного из турбокомпрессоров, но и у всего двигателя в целом (детали цилиндров, получавших дополнительное количество пыли, также имели повышенный износ).



Рис.17. Впускной коллектор с изменяемой длиной каналов V-образного 6-цилиндрового бензинового двигателя

Еще более сильное влияние инерции пыли на ее перераспределение по каналам обнаруживается у некоторых конструкций впускных коллекторов. Так, в компактных конструкциях с использованием дозарядки цилиндров путем изменения длины каналов (рис.17) характерна высокая скорость воздуха в коллекторе. При этом происходит своего рода мультипликация абразивного износа – за счет описанных выше свойств современных волокнистых воздушных фильтров во впускную систему ДВС со временем может попадать все большее количество абразивных частиц пыли, которые не только сами по себе приводят к абразивному износу, но и вызывают за счет инерции еще большее локальное усиление износа путем перераспределения пыли в последние (по потоку) цилиндры.



Рис.18. Чрезвычайно сильный избирательный абразивный износ поршня №1 за 80.000 км, при этом в других цилиндрах износа почти нет

В результате в один цилиндр может собираться столько пыли, что ресурс его деталей (и ДВС в целом) за счет абразивного износа уменьшится во много раз (рис.18) по сравнению с остальными цилиндрами, ресурс которых, наоборот, только вырастет. Это может приводить к преждевременным отказам ДВС за счет чрезвычайно сильного абразивного износа только в одном цилиндре, даже в пределах срока гарантии производителя.

Выводы

1. Пыль обладает не только абразивными свойствами, но и инерцией частиц, из-за чего вследствие центрифугирования может неравномерно распределяться по элементам конструкции впускной системы ДВС, что особенно характерно при использовании воздушных фильтров из современных волокнистых материалов.

2. Произвольное изменение одного элемента конструкции ДВС (воздушный фильтр), даже если этот элемент сам по себе несет какие-то преимуще-

ства, может спровоцировать чрезвычайно сильное падение надежности и ресурса создаваемого или модернизируемого двигателя, если пренебречь центрифугированием пыли в разветвляющихся каналах, что указывает на необходимость не только учета этих процессов при проектировании, но и возможного уточнения регламентов обслуживания ДВС.

3. Разработанная методика расчета перераспределения пыли по инерции позволяет устанавливать причину наблюдаемого на практике чрезвычайно сильного локального абразивного износа ДВС, что подтверждается как результатами моделирования 2-фазного течения, так и данными реальных расследований причин отказов ДВС.

Список литературы:

1. Григорьев М.А. Износ и долговечность автомобильных двигателей [Текст] / М.А. Григорьев, Н.Н. Пономарев. - М.: Машиностроение, 1976. - 248 с.
2. Мигаль В.Д. Техническая диагностика автомобильных двигателей. Т.3. Практические основы диагностирования [Текст] / В.Д. Мигаль. - Харьков: Майдан, 2014. - 444 с.
3. Lakshminarayanan P.A. Critical component wear in heavy duty engines [Text] / P.A. Lakshminarayanan, N.S. Nayak. - Singapore, John Wiley & Sons Ltd., 2011. - 424 p.
4. Yamagata H. The science and technology of materials in automotive engines [Text] / Yamagata H. - Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2005. - 331 p.
5. Мышкин Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии [Текст] / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. - М.: Изд-во Физматлит, 2007. - 368 с.
6. Шаповалов В.В. Триботехника [Текст] / под ред. В.В. Шаповалова. - Ростов н/Д.: Изд-во "Феникс", 2017. - 348 с.
7. Rahnejat H. Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain: Fundamentals, Applications and Future Trends [Text] / H. Rahnejat. - Cambridge: Woodhead Publishing, 2010. - 1018 p.
8. Hoag K.L. Vehicular Engine Design. Powertrain [Text] / K.L. Hoag. - Wien: Springer-Verlag, 2006. - 223 p.
9. Хрулев А.Э. Экспертиза технического состояния и причины неисправностей автомобильной техники [Текст] / В.Б. Дроздовский, С.К. Лосавио, А.Э. Хрулев. - М.: Издательство АБС, 2019. - 966 с.
10. Хрулев А.Э. Ремонт двигателей зарубежных автомобилей [Текст] / А.Э. Хрулев. - М.: Изд-во "За Рулем", 1998. - 480 с.
11. Van Basshuysen R. Internal Combustion Engine. Basics, Components, Systems, and Perspectives [Text] / R. Van Basshuysen, F. Schäfer. - Warrendale: SAE International, 2004. - 812 p.
12. Palocz-Andresen M. Decreasing Fuel Consumption and Exhaust Gas Emissions in Transportation: Sensing, Control and Reduction of Emissions [Text] / M. Palocz-Andresen. - Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. - 318 p.
13. MS Motorservice. Техническая брошюра по фильтрам [Текст]: пер. с нем. - Neuenstadt: MS Motorservice International GmbH, 2014. - 47 с.
14. Sutherland K. Filters and Filtration Handbook. 5-th Edition [Text] / K. Sutherland. - Burlington: Elsevier Ltd, 2008. - 523p.
15. Хрулев А. Гарантийный возраст дожития [Текст] / А. Хрулев, Ю. Буцкий // АБС Авто. - 2017. - 07. С. 46-50.
16. Основы фильтрации: Часть 1 [Электронный ресурс] / НПО ДСТ, 2016. - режим доступа: http://pallekb.ru/триботехническое_значение_фильтрации/. - 20.05.2020 г.
17. Сказ о

- том, как фильтры пачкаются [Электронный ресурс] / ТИОН, 2016. – режим доступа: <https://habr.com/ru/company/tion/blog/397457/>. - 20.05.2020 г. 18. Trautmann P. High Performance Nanofibre Coated Filter Media for Engine Intake Air Filtration [Электронный ресурс] / P. Trautmann, M. Durst, A. Pelz, N. Moser. - AFS 2005 Conference and Expo, April 10-13, 2005. - 9p. - режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/292649030_High_performance_nanofibre_coated_filter_media_for_engine_intake_air_filtration/. - 20.05.2020.19. Sukhapure K. CFD Modelling and Validation of Head Losses in Pipe Bifurcations [Text] / K. Sukhapure, A. Burns, T. Mahmud, J. Spooner // 13th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Slovenia, 2017. - pp. 489–494. 20. Tang Z. Effect of Particle Size and Shape on Separation in a Hydrocyclone [Text] / Z. Tang, L. Yu, F. FWang, N. Li, Chang L., N. Cui // Water. - 2019. - 11, No.16. – 19 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/w11010016>. 21. Архипов В.А. Движение частиц дисперсной фазы в несущей среде [Текст] / В.А. Архипов, А.С. Усанина. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. – 252 с. 22. Архипов В.А. Движение аэрозольных частиц в потоке [Текст]: Учеб. пособие / В.А. Архипов, А.С. Усанина. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2013. – 92 с. 23. ANSYS Free Student Software Downloads [Электронный ресурс] / ANSYS, Inc., 2019. – режим доступа: <https://www.ansys.com/academic/free-student-products/>. - 20.10.2019. 24. Федорова Н.Н. Основы работы в ANSYS 17 [Текст] / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. - М.: ДМК Пресс, 2017. - 210 с. 25. Мазо А.Б. Моделирование турбулентных течений несжимаемой жидкости [Текст] / А.Б. Мазо. - Казань: КГУ, 2007. – 106 с. 26. Isermann R. Combustion Engine Diagnosis: Model-based Condition Monitoring of Gasoline and Diesel Engines and their Components [Text] / R. Isermann. - Berlin: Springer-Verlag GmbH, 2017. - 303 p.
- Bibliography (transliterated):**
1. Grigoryev, M.A., Ponomarev, N.N. (1976), "Izнос i dolgovechnost avtomobilnykh dvigatelei" [Wear and durability of automotive engines], Moscow, Mashinostroenie Publ., 248 p. 2. Migal, V.D. (2014), "Tekhnicheskaya diagnostika avtomobilnykh dvigatelei. I.3: Prakticheskie osnovy diagnostirovaniya" [Technical diagnostics of automotive engines. I.3: Practical Diagnostic Basics], Kharkov, Maidan, 444 p. (In Russian) 3. Lakshminarayanan, P.A., Nayak, N.S. (2011), "Critical component wear in heavy duty engines", Singapore, John Wiley & Sons Ltd., 424 p. 4. Yamagata, H. (2005), "The science and technology of materials in automotive engines", Cambridge, Woodhead Publishing Ltd, 331 p. 5. Myshkin, M.K., Petrokovetz, M.B. (2007), "Trenie, smazka, iznos: Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya tribologii" [Friction, Lubrication, Wear: Physical Fundamentals and Technical Applications of Tribology], Moscow, Phizmatlit Publ., 368 p. (In Russian) 6. Shapovalov, V.V. (2017), "Tribotekhnika" [Tribotechnology], Ros-tov n/D, Feniks Publ., 348 p. 7. Rahnejat, H. (2010), "Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain: Fundamentals, Applications and Future Trends", Cambridge, Woodhead Publishing, 1018 p. 8. Hoag, K.L. (2006), "Vehicular Engine Design. Powertrain", Wien, Springer-Verlag, 223p. 9. Khrulev, A.E., Drozdovskiy, V.B., Losavio, S.K. (2019), "Expertiza tekhnicheskogo sostoyaniya i prichiny neispravnosti avtomobilnoi tekhniki" [Technical condition expertise and automotive vehicle fault causes], Moscow, ABS Publ., 966 p. (In Russian). 10. Khrulev, A.E. (1998), "Remont dvigatelei zarubejnykh avtomobilei" [Foreign car engine repair], Moscow, Za Rulem Publ., 440 p. (In Russian). 11. Van Basshuysen, R., Schäfer, F. (2004), "Internal Combustion Engine. Basics, Components, Systems, and Perspectives", Warrendale, SAE International, 812 p. 12. Palocz-Andresen, M. (2013), "Decreasing Fuel Consumption and Exhaust Gas Emissions in Transportation: Sensing, Control and Reduction of Emissions", Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 318 p. 13. MS Motorservice (2014), "Tekhnicheskaya broshura po filtram" [Technical filter brochure], Neuenstadt, MS Motorservice International GmbH, 47 p. (In Russian). 14. Sutherland, K. (2008), "Filters and Filtration Handbook", 5-th Edition, Burlington, Elsevier Ltd, 523 p. 15. Khrulev, A., Butzkiy, U. (2017), "Garantiyani vozrast dojitiya" [Guaranteed age of survival]. ABS Avto, no. 07. pp. 46–50. (In Russian). 16. Osnovy filtratzii: Chast 1 [Filtering Basics: Part 1]. NPO DST, 2016. Available at: http://pallekb.ru/tribotekhnicheskoe_znachenie_filytratsii/ (accessed 20.05.2020). 17. Skaz o tom kak filtry pachkautsya [The tale of how filters get dirty]. ТИОН, 2016. Available at: <https://habr.com/ru/company/tion/blog/397457/> (accessed 20.05.2020). 18. Trautmann, P., Durst, M., Pelz, A., Moser, N. (2005), "High Performance Nanofibre Coated Filter Media for Engine Intake Air Filtration" AFS 2005 Conference and Expo, April 10-13, 9 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/292649030_High_performance_nano_fibre_coated_filter_media_for_engine_intake_air_filtration/ (accessed 20.05.2020). 19. Sukhapure, K., Burns, A., Mahmud, T., Spooner, J. (2017), "CFD Modelling and Validation of Head Losses in Pipe Bifurcations", 13th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Slovenia, pp. 489–494. 20. Tang, Z., Yu, L., Wang, F., Li, N., Chang, L., Cui, N. (2019), "Effect of Particle Size and Shape on Separation in a Hydrocyclone", Water, Vol. 11, No. 16. 19 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/w11010016>. 21. Arkhipov, V.A., Usanina, A.S. (2014), "Dvijenie chastitz dispersnoi fazy v nesuschei srede" [The motion of particles of a dispersed phase in a carrier medium], Tomsk, Publishing House of Tomsk State University, 252 p. (In Russian). 22. Arkhipov, V.A., Usanina, A.S. (2013), "Dvijenie aerezolnykh chastitz v potoke" [The movement of aerosol particles in a stream], Tomsk, Publishing House of Tomsk State University, 92 p. (In Russian). 23. ANSYS Free Student Software Downloads / ANSYS, Inc., 2019. Available at: <https://www.ansys.com/academic/free-student-products/> (accessed 20.10.2019). 24. Fedorova, N.N., Valger, S.A., Danilov, M.N., Zakharova, Yu.V. (2017), "Osnovy raboty v ANSYS 17" [Fundamentals work in ANSYS 17], Moscow, DMK Press, 210 p. (In Russian). 25. Mazo, A.B. (2007), "Modelirovanie turbulentykh techeniy neszimaemoy zhidkosti" [Modeling turbulent flows of an incompressible fluid], Kazan, KGU, 106 p. (In Russian). 26. Isermann, R. (2017), "Combustion Engine Diagnosis: Model-based Condition Monitoring of Gasoline and Diesel Engines and their Components", Berlin, Springer-Verlag GmbH, 303 p.

Поступила в редакцию 16.06.2020 г.

Хрулев Александр Эдуардович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, руководитель Международного моторного бюро, Немешаево, Киевская обл., Украина, e-mail: alo.engine@gmail.com, +380961632183, ORCID 0000-0002-6841-9225.

Дмитриев Сергей Алексеевич – доктор техн. наук, профессор кафедры Учебно-научного аэрокосмического института Национального авиационного университета, Киев, Украина, e-mail: sad@nau.edu.ua, +380444977364, ORCID 0000-0002-4461-1837.

**ВІПЛИВ КОНСТРУКЦІЇ СИСТЕМИ ВПУСКУ НА ЦЕНТРИФУГУВАННЯ ПИЛУ
І ЗНОШУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ СУЧАСНИХ ДВЗ**

О.Е. Хрульов, С.О. Дмитрієв

В умовах жорстких обмежень, що накладаються на конструкцію ДВЗ економічними та екологічними вимогами, є ризик нештатного і незапланованого зниження ресурсу ДВЗ внаслідок підвищеного абразивного зношування. Відповідно до цього мета роботи сформульована як дослідження типових конструкторських рішень впускних каналів ДВЗ з точки зору їх впливу на абразивний зношування деталей. При визначенні можливих джерел абразивних частинок було виявлено, що набули широкого поширення повітряні фільтри з волокнистих матеріалів, які мають властивість пропуску пилу при сильному забрудненні. У зв'язку з цим для типового елемента впускного каналу була розроблена методика розрахунку криволінійного руху частинки по лінії струму повітря з урахуванням сил, що діють поблизу бічного відведення з каналу. Розрахунок з допущенням про рух повітря по радіусу показав, що в результаті центрифугування частинка пилу відхиляється від лінії струму повітря і переходить на більший радіус тим сильніше, чим більше розмір частинки і швидкість повітря. Оцінка достовірності результатів розрахунку виконана шляхом чисельного моделювання двофазної течії за допомогою програмного комплексу ANSYS. Отримано збіг результатів розрахунку за методикою розрахунку руху частинки з результатами моделювання в діапазоні найбільш руйнівних при абразивному зношуванні розмірів частинок 10-20 мкм з точністю не гірше $\pm 20\%$. Порівняння результатів розрахунку і моделювання з даними виконаних досліджень причин несправностей ДВЗ підтвердило, що у впускній системі за рахунок нерівномірного розподілу частинок може виникнути локальне абразивне зношування в одному або декількох циліндрах. На підставі отриманих результатів сформульовані рекомендації щодо підвищення надійності та ресурсу ДВЗ в експлуатації, включаючи необхідність не тільки урахування процесів центрифугування пилу при проектуванні, а й можливого уточнення регламентів обслуговування вже що існують ДВЗ.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння; абразивний знос; впускний колектор; частинка; інерція; центрифугування.

**INFLUENCE OF THE INLET SYSTEM DESIGN ON DUST CENTRIFUGATION AND THE PARTS WEAR OF
THE MODERN INTERNAL COMBUSTION ENGINES**

A.E. Khrulev, S.A. Dmitriev

In conditions of severe restrictions imposed on the ICE design by economic and environmental requirements, there is a risk of abnormal and unplanned reduction of the ICE durability due to increased abrasive wear. In accordance with this, the objective of the work is formulated as a study of typical design solutions of the intake system of the internal combustion engines from the point of view of their influence on the abrasive wear of the parts. In determining the possible sources of abrasive particles, it was found that the widely used air filters from fibrous materials have the property to pass dust when heavily contaminated. In this regard, for a typical element of the inlet system, a method was developed for calculating the curvilinear motion of the particle along the air flow line considering the acting forces near the lateral outlet from the channel. Calculation with the assumption of the air movement along the radius showed that, as a result of centrifugation, the dust particle deviates from the air flow line and moves by a larger radius which increases with the particle size and air speed. The reliability of the calculation results was estimated by numerically simulating a two-phase flow using the ANSYS software package. A coincidence of the calculation results by the method of particle motion calculation with the simulation results in the range of the most destructive abrasive particles of 10-20 μm with an accuracy of no worse than $\pm 20\%$ is obtained. Comparison of calculation and simulation results with experimental data from studies of the causes of ICE failures confirmed that local abrasive wear in one or more cylinders can occur due to uneven particle distribution in the intake system. Based on the results obtained, recommendations are formulated to increase the reliability and durability of ICE in operation, including the need not only to take into account dust centrifugation processes during design, but also the possible refinement of maintenance procedures for existing ICEs.

Key words: internal combustion engine; abrasive wear; intake manifold; particle; inertia; centrifugation.