

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА И ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ ПЫЛИ В СИСТЕМАХ ВПУСКА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗНОС ДЕТАЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ДВС

*А. Э. Хрулев\*, С. А. Дмитриев\*\**

*\*Международное моторное бюро, \*\*Национальный авиационный университет (Киев)*

При создании новых ДВС давно стало принято использовать 3D-моделирование для определения как действующих нагрузок, так и особенностей течения воздуха и газов с целью оптимизации конструкций и их характеристик. Этим вопросам традиционно посвящается огромное количество работ [1, 2], однако практика показывает, что далеко не все особенности работы реальной конструкции в реальных условиях эксплуатации можно учесть с помощью моделирования.

В данной работе рассматриваются особенности процесса очистки (фильтрации) воздуха во впускной системе современных ДВС. Как известно, повышение экологических требований привело к постепенной замене традиционных бумажных воздушных фильтров на фильтры из так называемого "нетканного" синтетического волокна с нефиксированными порами (рис. 1).

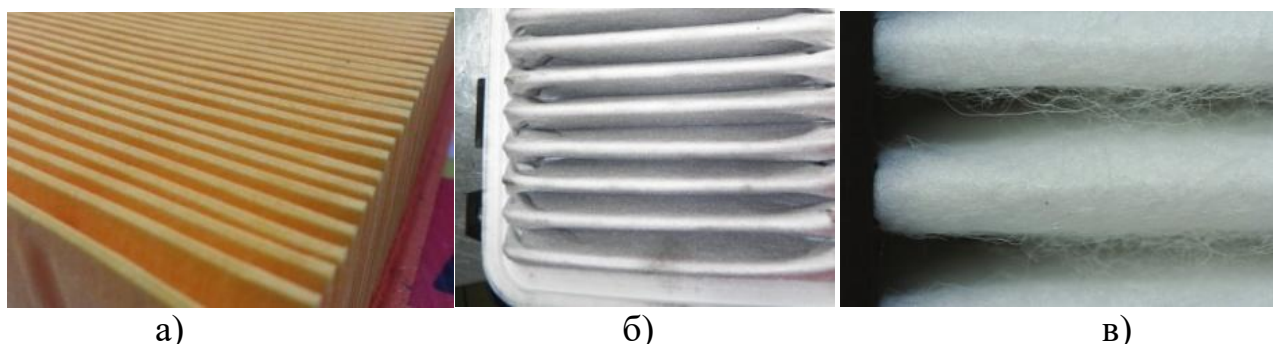


Рис. 1 – Воздушные фильтры: а) традиционный бумажный; б) нетканый волокнистый; в) фактура волокон при увеличении

Причины, по которым производители были вынуждены перейти на новый тип воздушных фильтров, вытекают из принципов, на которых строится работа фильтров. В самом деле, бумажные фильтры прекрасно работают в соответствии с механизмом непосредственного задержания частиц (с так называемым эффектом "сита"), т.е. вылавливают и задерживают все частицы, которые больше размера пор или расстояния между волокнами в фильтре (рис. 2). Причем, по мере загрязнения фильтра, его основные характеристики – эффективность очистки и тонкость отсева – возрастают. Однако из этого вытекают и серьезные недостатки бумажных фильтров – сравнительно небольшая грязеемкость и быстрый рост гидравлического сопротивления по мере загрязнения [3].

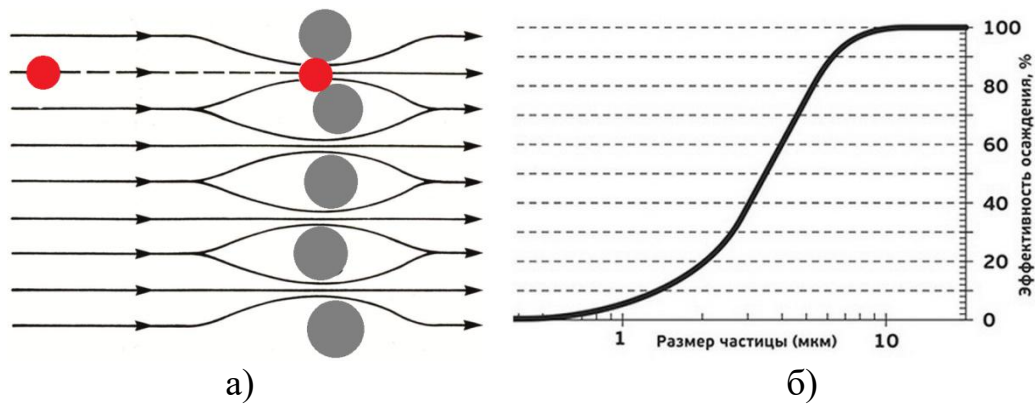


Рис. 2 – Непосредственное задержание частиц порами материала (эффект сита): а) механизм задержания частиц больше заданного размера; б) эффективность фильтра в зависимости от размера частиц

Именно эти недостатки стали одной из главных причин распространения волокнистых фильтров. Основное отличие волокнистых фильтров от бумажных состоит в том, что для фильтрации частице не обязательно застревать в волокнах – если она просто коснулась фильтровального материала, этого уже достаточно для эффективного осаждения. В результате эффективная фильтрация происходит при расстоянии между волокнами, значительно превышающем размеры частиц [4]. Такие свойства волокнистых фильтров связаны с несколькими процессами, в том числе, с адгезией, диффузией, инерцией (рис. 3) и другими эффектами.

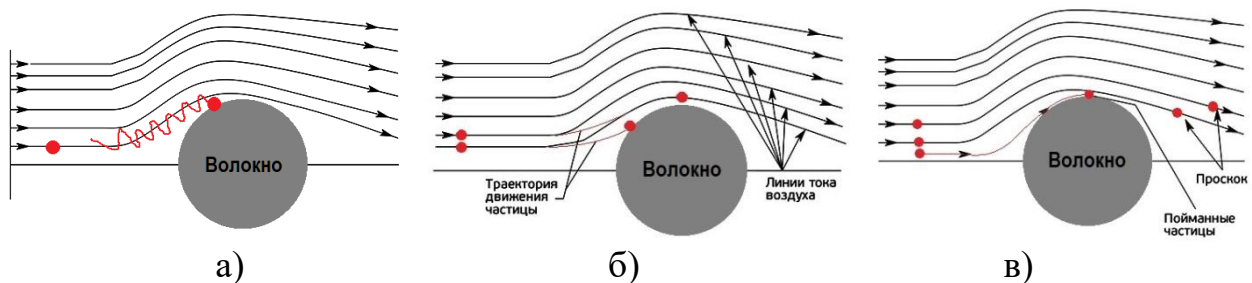


Рис. 3 – Основные эффекты, на которых основана работа современных волокнистых фильтров: а) диффузии; б) инерции; в) зацепления

Характерно, что заметного засорения волокнистого фильтра со временем не происходит, поскольку частицы не закупоривают поры, а налипают на волокна [5], 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, а его влияние на работу двигателя минимально.

Таким образом, если у старых бумажных фильтров со временем наблюдалось повышение эффективности очистки при увеличении сопротивления, то у современных волокнистых фильтров следует выделить постепенное ухудшение эффективности очистки как главную особенность.

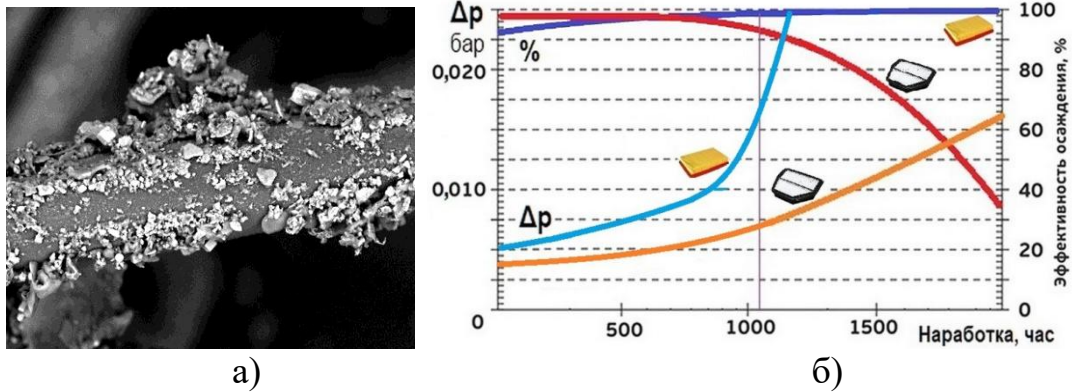


Рис. 4 – Частицы, задержанные на поверхности волокон у волокнистого фильтра (а), и сравнение волокнистого фильтра с бумажным по перепаду давления и эффективности фильтрации в процессе эксплуатации (б)

С другой стороны, опыт расследования причин отказов [6] показывает, что многие конструкции двигателей, а также принципы их конструирования [1], 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.

С целью определения таких неисправностей было рассмотрено движение частицы пыли по криволинейной траектории (рис. 5) вблизи бокового отвода из канала в виде тройника [7], который нередко встречается в конструкции воздухопроводов двигателей различных типов.

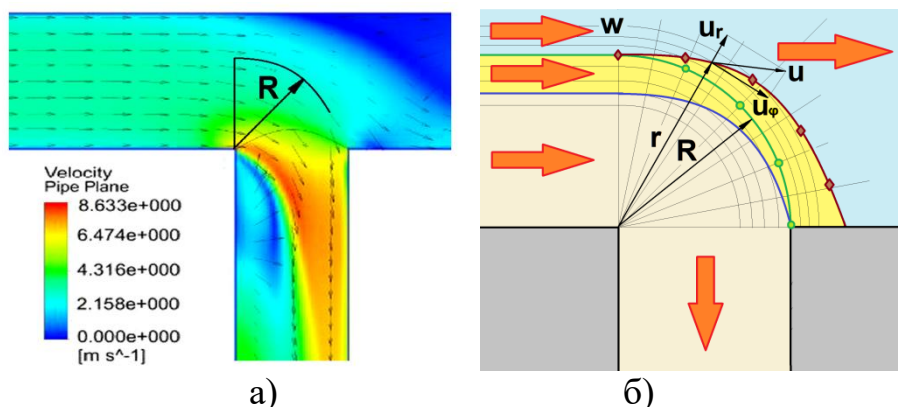


Рис. 5 – Линии тока при течении с боковым отводом (а) и расчетная схема для частицы при ее движении по криволинейной траектории (б)

Движение частицы массой  $m$ , зависящей от диаметра  $d$  и плотности  $\rho_p$  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 частицы определяется действием большого числа различных сил  $F_i$  [8], 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 [9]:

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

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 из двух уравнений для радиального и окружного ускорения частицы в виде:

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

где  $u_r, u_\varphi$  – радиальная и окружная составляющие скорости частицы,  $w$  – скорость потока воздуха (для упрощения принято, что воздух движется по окружности с постоянной скоростью),  $\rho$  – плотность воздуха,  $C_D$  – коэффициент аэродинамического сопротивления, рассчитываемый по одной из формул для сферы (например, при числе Рейнольдса в диапазоне  $0,01 < Re < 700$  справедлива формула Клячко [10]  $C_D = 24/Re + 4/\sqrt[3]{Re}$ ).

Система (2) решается численно с начальными условиями: при  $\tau = 0$   $\varphi = 0, u_\varphi = w, u_r = 0$  для заданного радиуса  $R$  и скорости течения воздуха  $w$  при заданном размере частицы. Имея ускорения, легко найти составляющие скорости частицы по направлениям, а также определить траекторию движения частицы и ее отклонение от линий тока воздуха.

Для практической цели исследования важно получить распределение частиц по каналам, т.е. определить, сколько частиц проскочит боковой отвод при повороте потока. В первом приближении при малых отклонениях от кругового движения было принято простое соотношение для траектории частицы (рис. 5б) – если в конце поворота потока наблюдается уход частицы на радиус, больший радиуса  $R$  на величину  $\Delta R$ , то можно принять, что такая частица попала бы на край канала в том случае, если она начнет криволинейное движение на начальном радиусе, который меньше  $R$  на ту же величину  $\Delta R$ .

На рис. 6 представлены результаты расчета относительного количества частиц в прямом канале  $N_{ex}/N_{in}$  как отношение частиц на выходе  $N_{ex}$  к общему количеству частиц на входе  $N_{in}$  при различных углах поворота потока в отводе и при разной скорости воздуха (она пропорциональна режиму работы двигателя при заданном сечении каналов и объеме цилиндров двигателя) для частиц разных размеров.

Хорошо видно, что при увеличении угла, размера частиц и скорости потока количество "проскочивших" поворот частиц увеличивается, что приводит к уменьшению относительного количества пыли, попадающего в отвод, и, соответственно, к увеличению количества пыли в прямом канале до 65–75 % от общего количества пыли на входе. То есть, боковой отвод в воздуховоде перераспределяет (центрифугирует) пыль так, что при условии одинакового расхода воздуха в прямой канал будет направлено больше пыли.

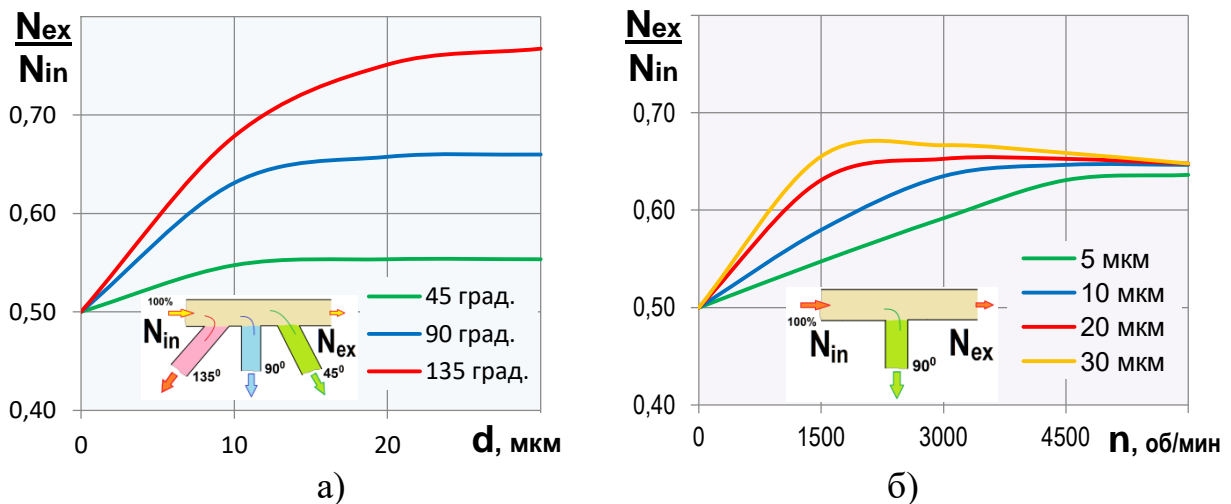


Рис. 6 – Влияние угла отвода (а) и режима работы двигателя (скорости воздуха в канале) при разных размерах частиц (б) на относительное (т.е. отнесенное к общему количеству частиц на входе) количество частиц пыли на выходе

И действительно, примеры такого перераспределения пыли были обнаружены в реальных конструкциях [3, 6]. На рис. 7 хорошо видно, что входные кромки лопаток турбокомпрессора, получавшего воздух из дальнего канала патрубка с отводом, сильно повреждены в результате газоабразивного износа, в то время как лопатки компрессора, питаемого воздухом через боковой отвод, практически не имеют износа.

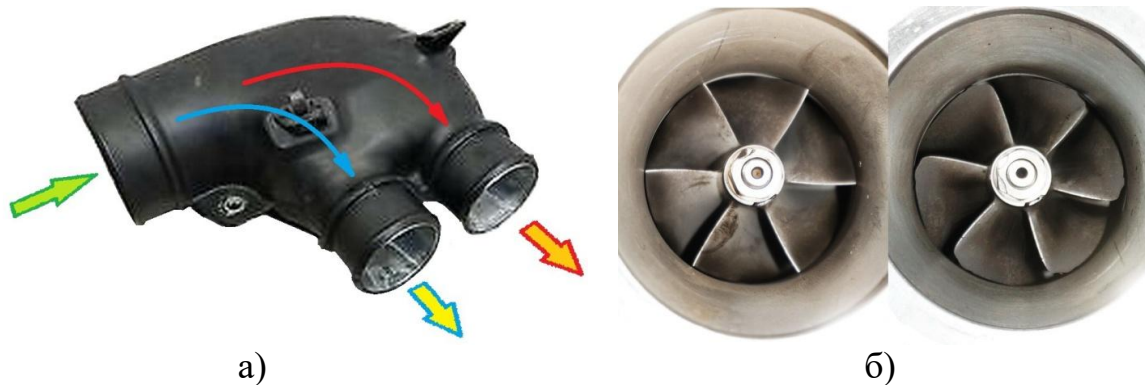


Рис. 7 – Патрубок для разветвления потока от воздушного фильтра к турбокомпрессорам правого и левого ряда цилиндров V-образного 8-цилиндрового двигателя (а) и входные кромки лопаток турбокомпрессоров как результат эксплуатации в течение 42000 км пробега автомобиля (б)

Учитывая, что в исследуемом случае применялся волокнистый воздушный фильтр, его сочетание с патрубком, имеющим очевидное и безобидное, на первый взгляд, конструктивное исполнение, фактически получилось непригодно для двигателя в реальных условиях эксплуатации – ресурс оказался снижен не только у одного из турбокомпрессоров, но и у всего двигателя в целом, поскольку ряд цилиндров, получавший дополнительное количество пыли, также имел повышенный износ.

Результаты исследований показывают, что не только при разработке новых конструкций, но также и при внесении даже незначительных изменений в существующие конструкции моделирования процессов может оказаться недостаточно, необходимо еще хорошо понимать и учитывать особенности эксплуатации, в противном случае велик риск получить снижение надежности и ресурса.

## Литература

1. Van Basshuysen R., Schäfer F. (Ed.) Internal Combustion Engine. Basics, Components, Systems, and Perspectives / R. Van Basshuysen, F. Schäfer. – Warrendale: SAE International, 2004. – 812 p.
2. Chiodi M. An Innovative 3D-CFD Approach towards Virtual Development of Internal Combustion Engines / M. Chiodi. – Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien, 2011. – 245 p.
3. Хрулев А. Гарантийный возраст дожития / А. Хрулев, Ю. Буцкий. – АБС Авто, 2017, 07, с. 46–50.
4. Основы фильтрации. Часть 1. – НПО ДСТ, 2016. – URL: [http://pallekb.ru/триботехническое\\_значение\\_фильтрации](http://pallekb.ru/триботехническое_значение_фильтрации) (Дата обращения 20.02.2020).
5. Сказ о том, как фильтры пачкаются. – ТИОН, 2016. – URL: <https://habr.com/ru/company/tion/blog/397457> (Дата обращения 20.02.2020).
6. Хрулев А. Э. Экспертиза технического состояния и причины неисправностей автомобильной техники / В. Б. Дроздовский, С. К. Лосавио, А. Э. Хрулев. – Москва: Издательство АБС, 2019. – 966 с.
7. Sukhapure K. CFD Modelling and Validation of Head Losses in Pipe Bifurcations / K. Sukhapure, A. Burns, T. Mahmud, J. Spooner. – Slovenia, 13th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 2017, pp. 489–494.
8. Tang Z. Effect of Particle Size and Shape on Separation in a Hydrocyclone / Z. Tang, L. Yu, F. FWang, N. Li, Chang L., N. Cui. – DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/w11010016>. – Water, 11 (16), 2019. – 19 p.
9. Архипов В. А. Движение частиц дисперсной фазы в несущей среде: Учеб. пособие / В. А. Архипов, А. С. Усанина. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. – 252 с.
10. Архипов В. А. Движение аэрозольных частиц в потоке: Учеб. пособие / В. А. Архипов, А. С. Усанина. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2013. – 92 с.

## Сведения об авторах

**Хрулев Александр Эдуардович** – к.т.н., с.н.с., судебный эксперт Международного моторного бюро.

**Дмитриев Сергей Александрович** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Национального авиационного университета (Киев).

## **Відомості про авторів**

**Хрулев Олександр Едуардович** – к.т.н., с.н.с., судовий експерт Міжнародного моторного бюро.

**Дмитрієв Сергій Олександрович** – д.т.н., професор, завідувач кафедри Національного авіаційного університету (Київ).

## **Information about authors**

**Khrulev Aleksandr** – PhD, Senior Researcher, Judicial Expert of International Motor Bureau.

**Dmitriev Sergej** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Chair of the National Aviation University (Kiev).