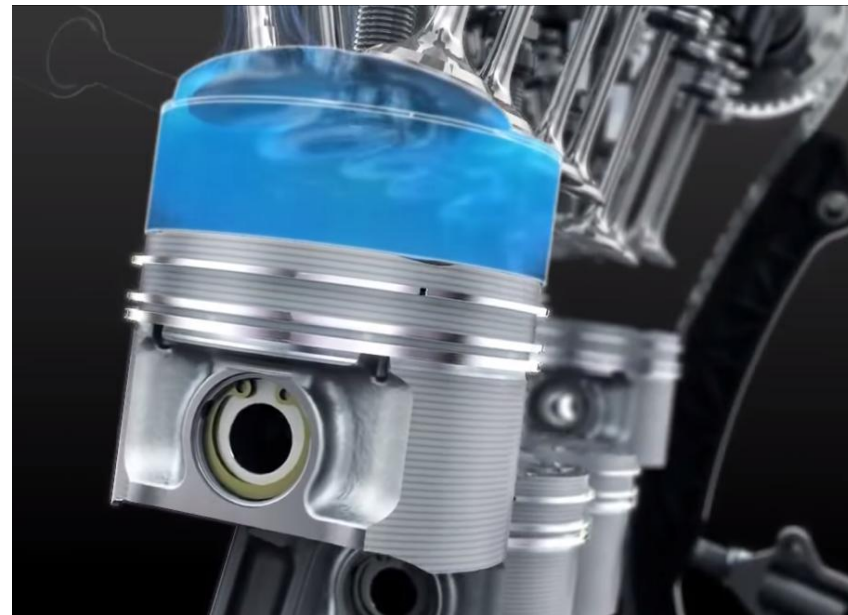


НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА И ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ ПЫЛИ В СИСТЕМАХ ВПУСКА



И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗНОС ДЕТАЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ДВС

А. Э. Хрулев, С. А. Дмитриев



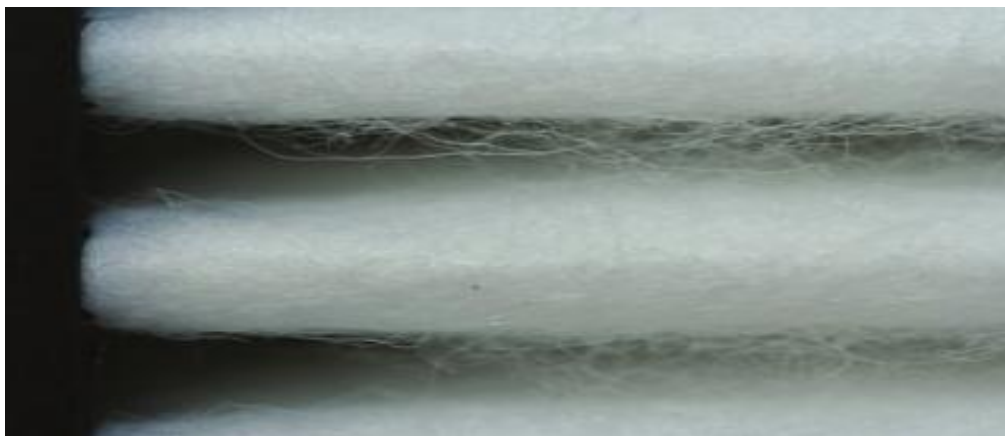
MPP&O-2020

► Рассматриваемые типы воздушных фильтров:



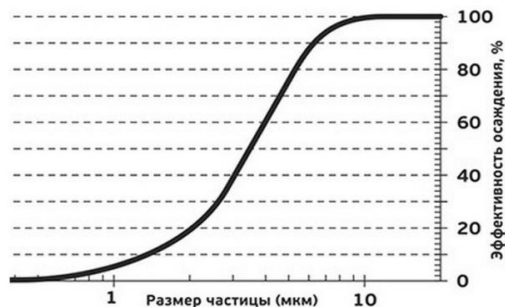
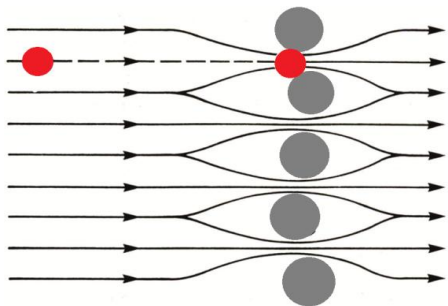
1. Традиционные бумажные воздушные фильтры: были распространены в автомобильном транспорте до 2000 года.

2. Волокнистые фильтры: Из "нетканного" синтетического волокна с нефиксированными порами.



Причина перехода на новые фильтры – повышение экологических требований к двигателям.

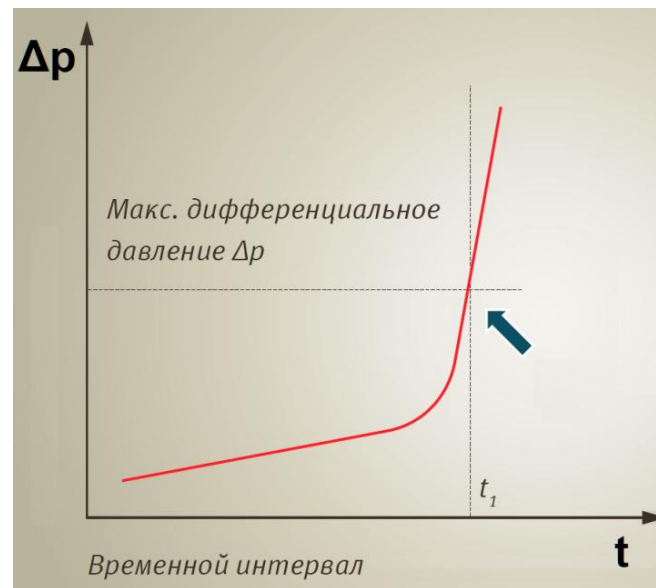
▶ Бумажные воздушные фильтры (преимущества и недостатки):



- 1) прекрасно работают в соответствии с механизмом непосредственного задержания частиц (так называемый эффект "сита"), т.е. вылавливают и задерживают все частицы, которые больше размера пор или расстояния между волокнами в фильтре,
- 2) по мере загрязнения фильтра его основные характеристики – эффективность очистки и тонкость отсева, возрастают.

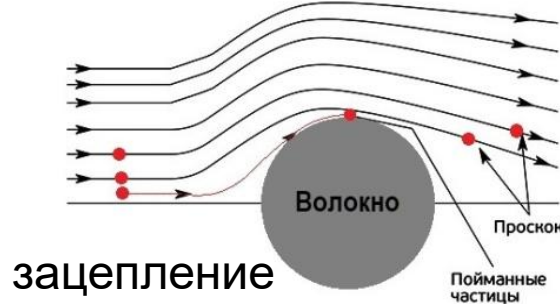
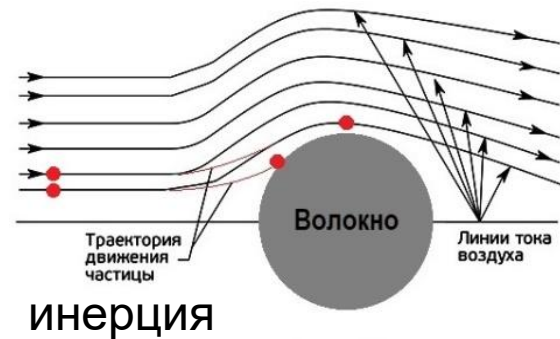
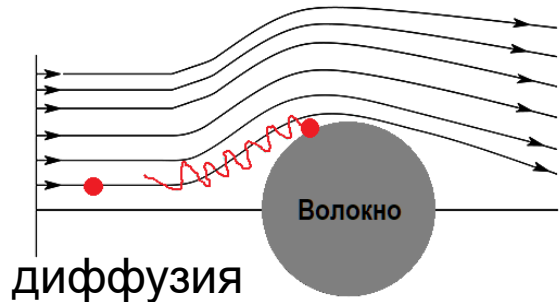
Из преимуществ бумажных фильтров вытекают их **серьезные недостатки**:

- 1) сравнительно небольшая грязеемкость,
- 2) быстрый рост гидравлического сопротивления по мере загрязнения фильтра.



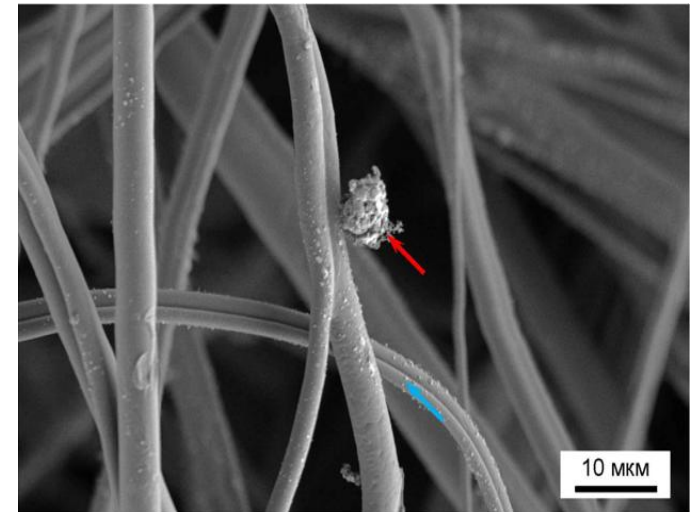
Результат: Бумажный фильтр быстро загрязняется, ограничивая подачу воздуха и ухудшая работу системы управления двигателем, что влияет на токсичность отходящих газов и противоречит экологическим требованиям.

▶ Волокнистые воздушные фильтры с нефиксированными порами



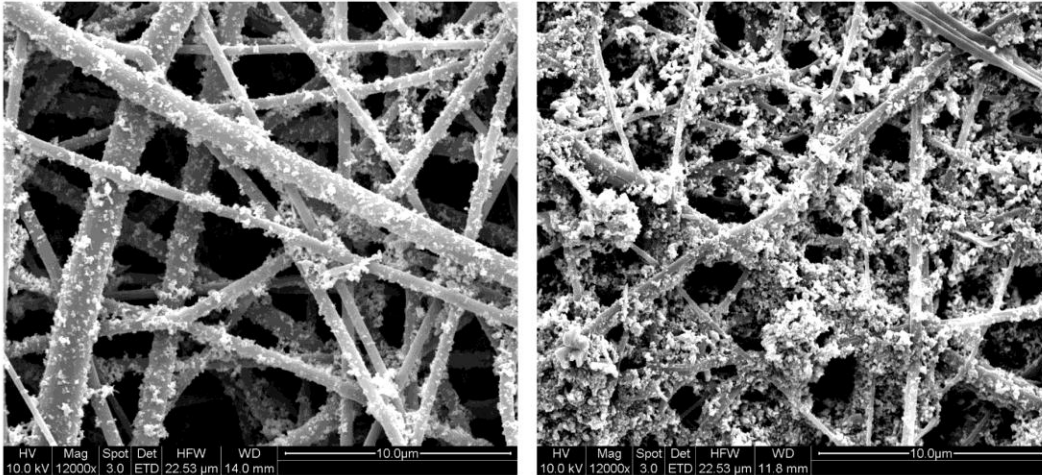
Основные свойства и преимущества:

1. Эффективная фильтрация происходит при расстоянии между волокнами, значительно превышающем размеры частиц.
2. Частицы не закупоривают поры, а налипают на волокнах за счет эффектов диффузии, инерции, зацепления и др.
3. Проходные сечения между волокнами остаются в той или иной степени свободными, эффект сита минимален.
4. Явного засорения волокнистого фильтра со временем не происходит.
5. Заметного роста гидравлического сопротивления фильтра в эксплуатации также не происходит, а его влияние на работу двигателя минимально.



ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА В СОВРЕМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

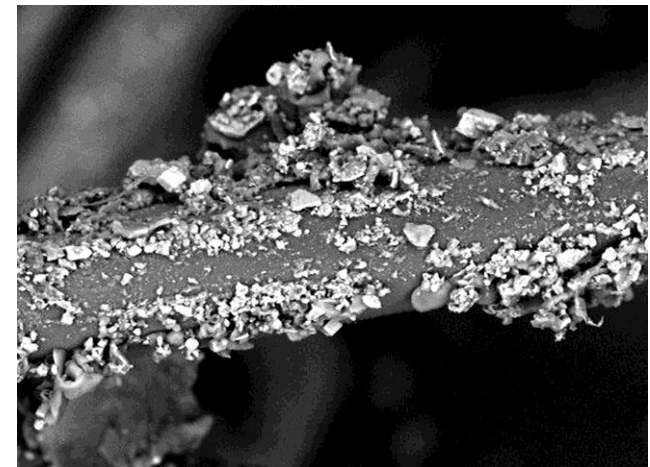
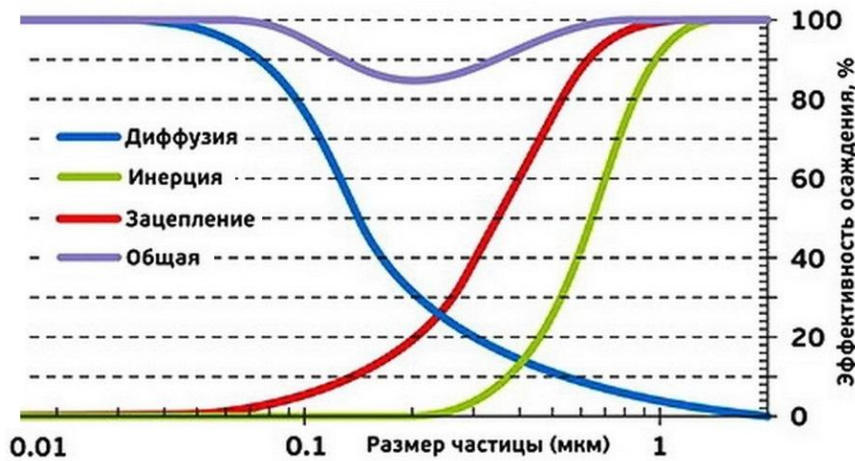
▶ Волокнистые воздушные фильтры с нефиксированными порами



Основные особенности:

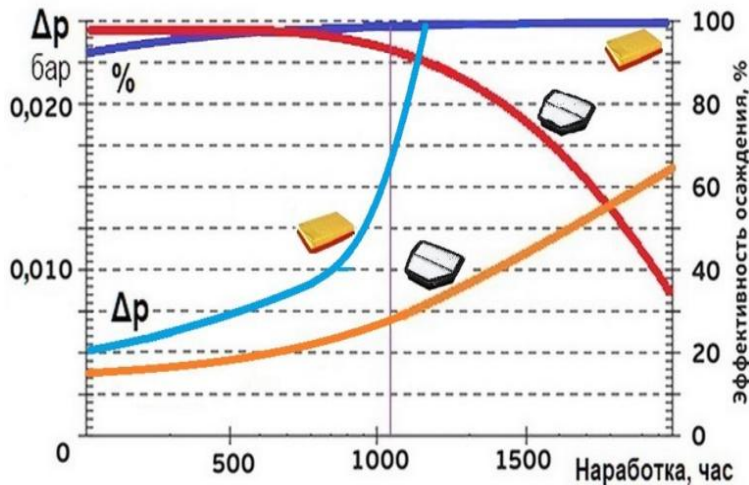
Осаждение частиц на поверхности волокон – главная особенность волокнистых фильтров.

Заметного засорения волокнистого фильтра со временем не происходит, поскольку частицы не закупоривают поры, а налипают на волокнах.



Совместное действие всех эффектов обеспечивает исключительно высокую эффективность очистки.

▶ Сравнение воздушных фильтров разных типов



Старые бумажные фильтры

- ❑ в эксплуатации наблюдалось повышение эффективности очистки при увеличении сопротивления.

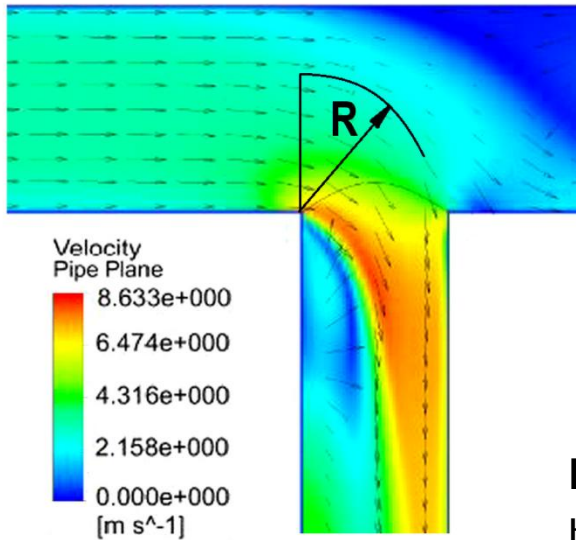
Современные волокнистые фильтры

- ❑ наоборот, происходит постепенное ухудшение эффективности очистки как главную особенность.



Простой переход с бумажных фильтров на волокнистые при неизменной конструкции двигателя может стать причиной новых неисправностей, которых ранее не встречалось.

ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦЫ ПЫЛИ ПО КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ ПО КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ



Воздуховод с разветвлением потока:
Линии тока при течении с боковым отводом



Частицы пыли:

Сфера диаметром $d = 5-30$ мкм

Материал – кварц SiO_2

Плотность $\rho_p = 2700$ кг/м³

Частицы равномерно распределены по площади входного сечения



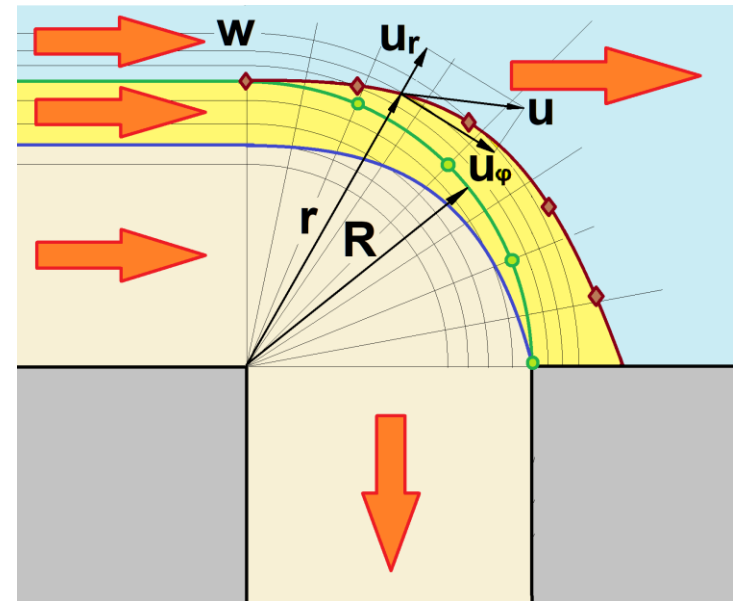
Расчетная схема для частицы при ее движении по криволинейной траектории при разветвлении потока

Действующие на частицу силы:

- тяжести, центробежная, Архимеда (выталкивания, центробежная), аэродинамического сопротивления, Кориолиса, Бассе (связанная с предысторией движения), Саффмена (подъемная), Магнуса (при вращении).

Движение частицы в потоке воздуха подчиняется 2-му закону Ньютона

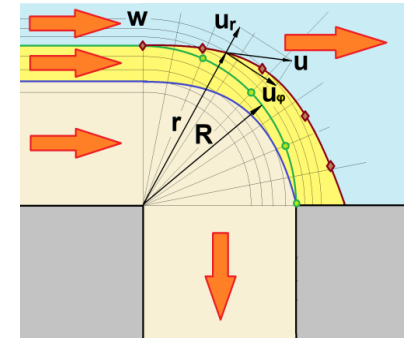
$$m \frac{d\vec{u}}{d\tau} = \sum_i \vec{F}_i$$



ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦЫ ПЫЛИ ПО КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ

Упрощающие допущения:

- 1) сила тяжести отсутствует (малый размер частиц, высокая скорость),
- 2) поток воздуха 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.



Требуется определить отклонение частицы от линии тока воздуха по радиусу при различных скоростях потока, углах отвода и размерах частиц.

Дополнительное условие для малых отклонений частицы от кругового движения – 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 канала в том случае, если она начнет криволинейное движение на начальном радиусе, который меньше R на ту же величину ΔR .

Уравнения для радиального и окружного ускорения частицы

$$m \frac{du_r}{d\tau} = F_{A\varphi} + F_{C_r} \quad m \frac{du_\varphi}{d\tau} = F_k + F_{C_\varphi}$$

Сила и коэффициент аэродинамического сопротивления, число Рейнольдса

$$\vec{F}_c = -C_D \rho \frac{\pi d^2}{8} \vec{u} \quad C_D = 24/Re + 4/\sqrt[3]{Re} \quad Re = \rho \frac{|\vec{w} - \vec{u}|}{\mu} d = \rho \frac{w - u_\varphi}{\mu} d$$

Радиальная и окружная составляющие силы аэродинамического сопротивления

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

Силы Архимеда (выталкивания, центробежная) и Кориолиса

$$F_{A\varphi} = \frac{m_p u_\varphi^2 - \rho V_p w_\varphi^2}{r} \quad F_k = -m_p \frac{u_\varphi u_r}{r} = -\rho_p V_p \frac{u_\varphi u_r}{r}$$



ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦЫ ПЫЛИ ПО КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ

Система уравнений для радиального и окружного ускорения частицы в криволинейно движущемся потоке воздуха

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



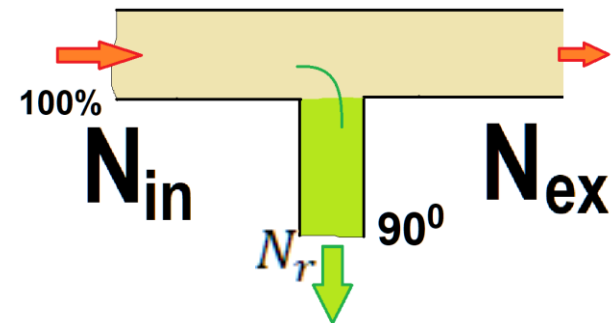
Начальные условия: $\tau = 0 \quad \varphi = 0 \quad u_\varphi = w \quad u_r = 0 \quad r = R$

Решение – численное интегрирование простым методом Эйлера:

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

$$r = r + u_r \Delta\tau$$

$$\varphi = \varphi + \frac{180}{\pi r} u_\varphi \Delta\tau \quad \varphi_w = \varphi_w + \frac{180}{\pi R} w \Delta\tau$$



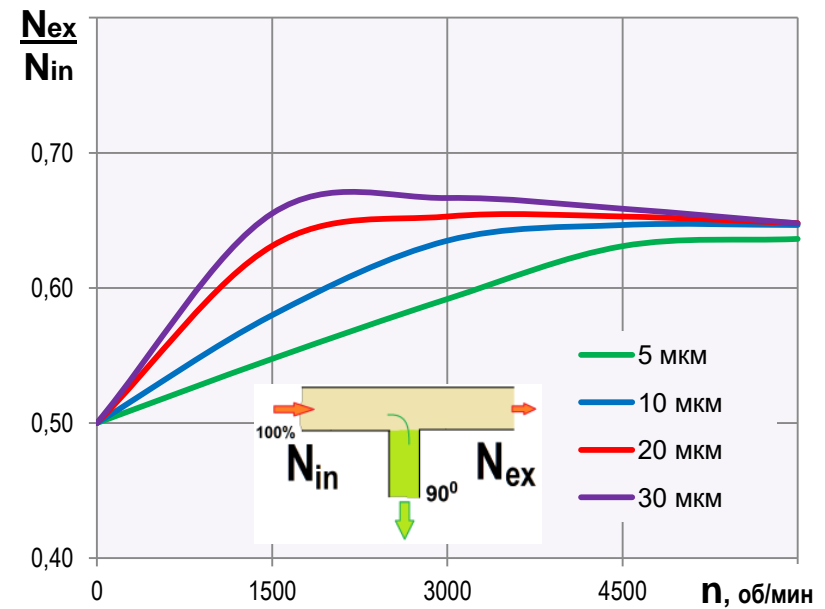
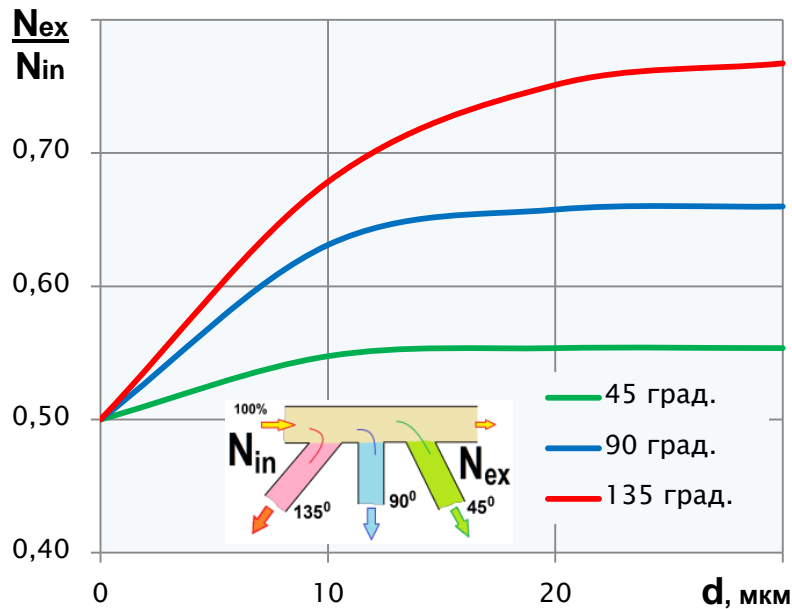
Представление результатов: $\Delta R = r_{\varphi=45,90,135}$

$$N_{in} = N_{ex} + N_r \quad N_r = 0,5 N_{in} (R - \Delta R) \quad \frac{N_{ex}}{N_{in}} = 0,5 \left(1 + \frac{\Delta R}{R} \right)$$

ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦЫ ПЫЛИ ПО КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ

Результаты расчета относительного количества частиц на выходе из прямого канала
(к количеству частиц на входе в канал)

- ❑ различные углы поворота потока в отводе (45° , 90° , 135°),
- ❑ разные скорости воздуха (скорость пропорциональна режиму работы двигателя при заданном сечении каналов и объеме цилиндров двигателя, соответствует значениям $u = 5-20$ м/с),
- ❑ частицы разных размеров в диапазоне 5-30 мкм.



1. Боковой отвод в воздухопроводе перераспределяет (**центрифугирует**) пыль так, что при условии одинакового расхода воздуха в прямой канал будет направлено больше пыли.

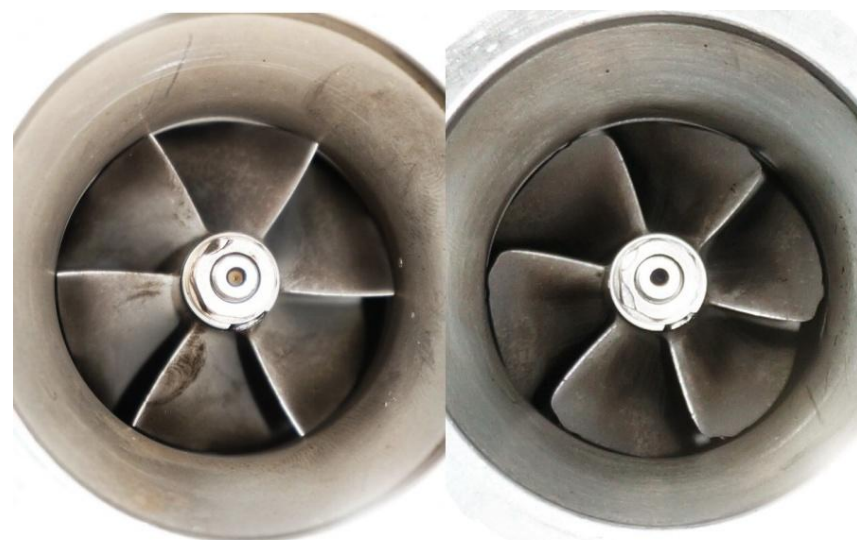
2. Количество "проскочивших" поворот частиц увеличивается с увеличением угла, размера частиц и скорости потока, что приводит к увеличению количества пыли в прямом канале до 65-75% от пыли на входе.



ПРИМЕР ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ ПЫЛИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОЛОКНИСТОГО ФИЛЬТРА

Патрубок с разветвлением потока от воздушного фильтра к турбокомпрессорам правого и левого ряда цилиндров V-образного 8-цилиндрового двигателя:

Избирательный газоабразивный износ входных кромок лопаток только одного турбокомпрессора за 42000 км пробега автомобиля:

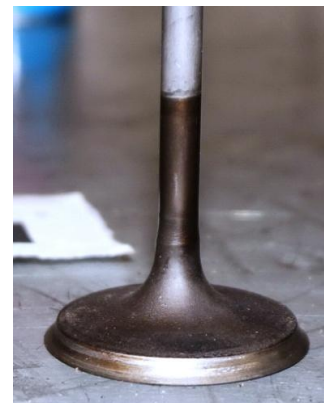


Результат:

Сочетание волокнистого воздушного фильтра с патрубком, имеющим очевидное и безобидное, на 1-й взгляд, конструктивное исполнение, фактически непригодно для двигателя в реальных условиях эксплуатации.

ВЫВОДЫ

1. Пыль обладает не только абразивными свойствами, но и инерцией, из-за которой может неравномерно распределяться по элементам впускной системы в результате центрифугирования.
2. Нельзя произвольно изменить один элемент конструкции двигателя (воздушный фильтр), даже если этот элемент сам по себе имеет какие-то преимущества.
3. При разработке новых конструкций, как 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 создаваемого или модернизируемого двигателя.



Спасибо за внимание!



С.А.Дмитриев, д.т.н., профессор
Аэрокосмический институт,
Национальный авиационный университет



А.Э.Хрулев, к.т.н.
Международное моторное бюро

