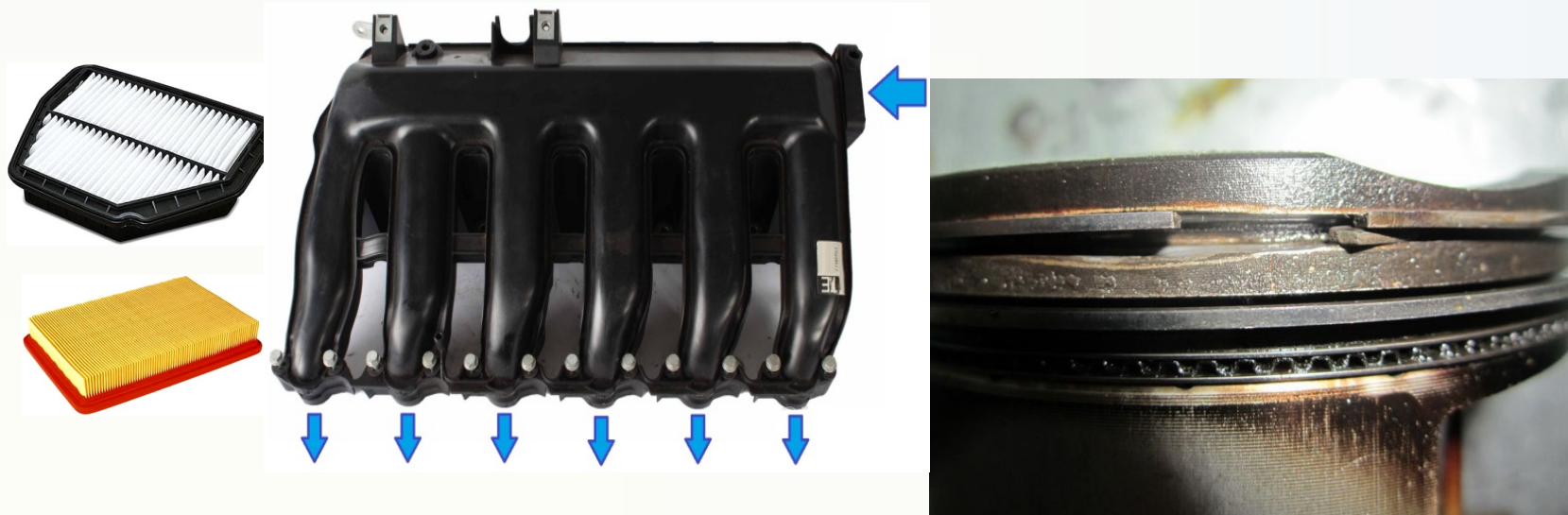


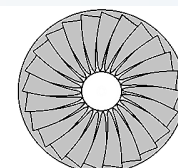
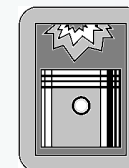
# ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ ПЫЛИ ВО ВПУСКНОЙ СИСТЕМЕ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ИЗНОС ДЕТАЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ДВС



*А. Э. Хрулев, С. А. Дмитриев*



XXV Международный Конгресс  
Двигателестроителей  
8-13 сентября 2020 г.

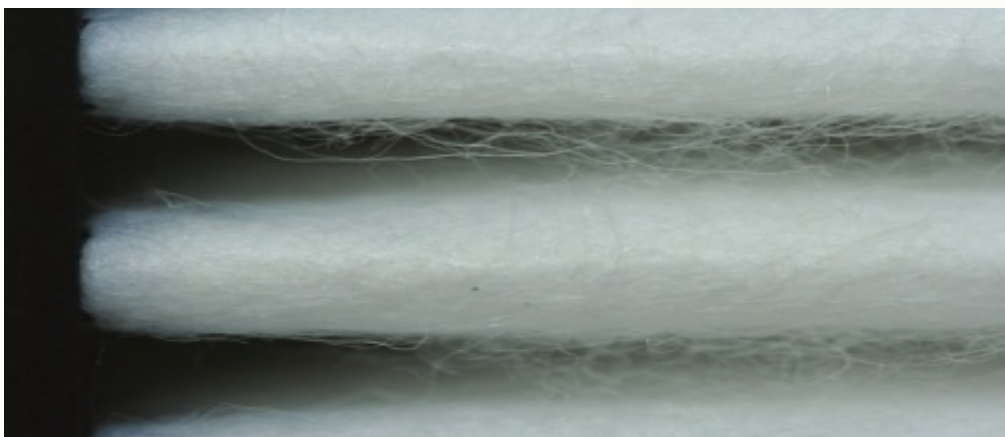


## Рассматриваемые типы воздушных фильтров:

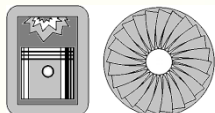


**1. Традиционные бумажные воздушные фильтры:**  
были распространены в автомобильном транспорте до 2000 года.

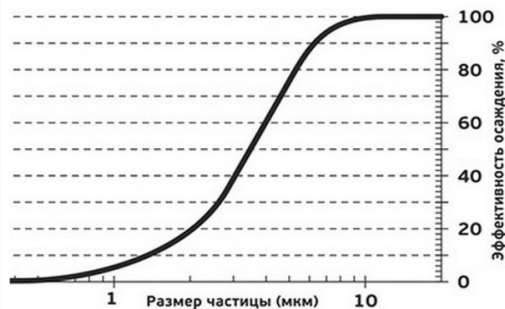
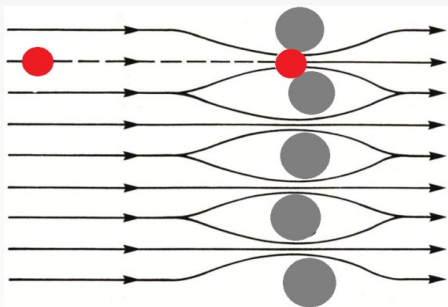
**2. Волокнистые фильтры:**  
Из "нетканного" синтетического волокна с нефиксированными порами.



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



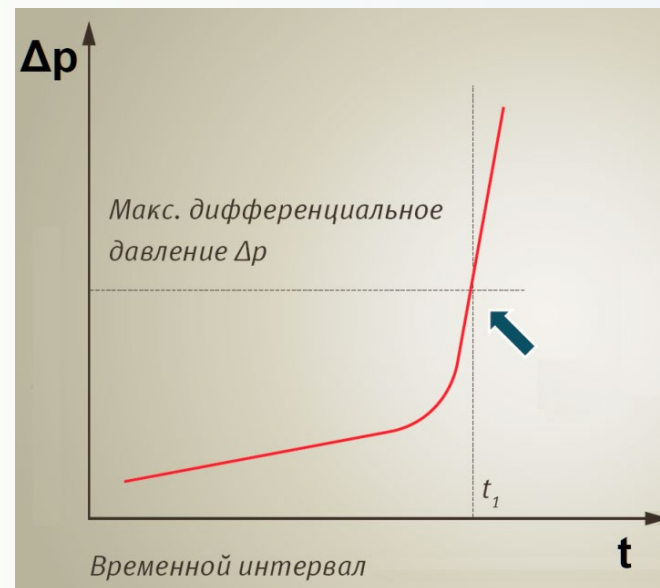
- **Бумажные воздушные фильтры (преимущества и недостатки):**



- 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:**

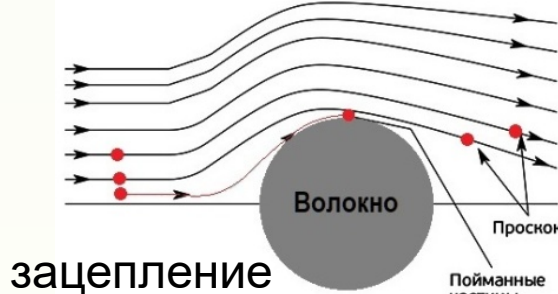
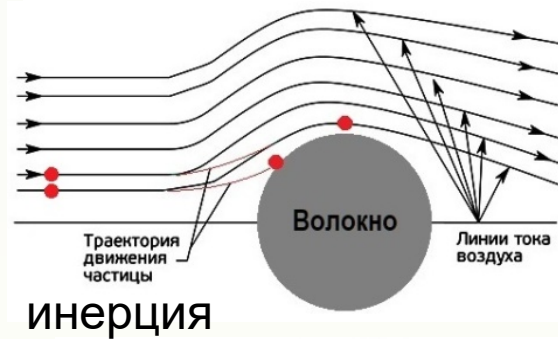
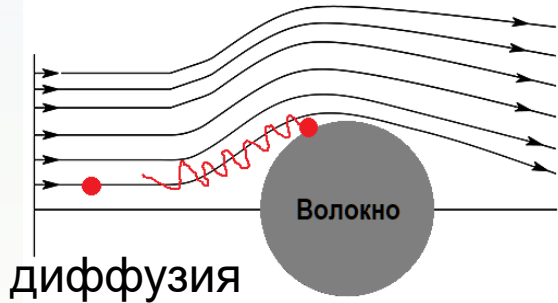
- 1) сравнительно небольшая грязеемкость,
- 2) быстрый рост гидравлического сопротивления по мере загрязнения фильтра.



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

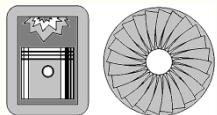
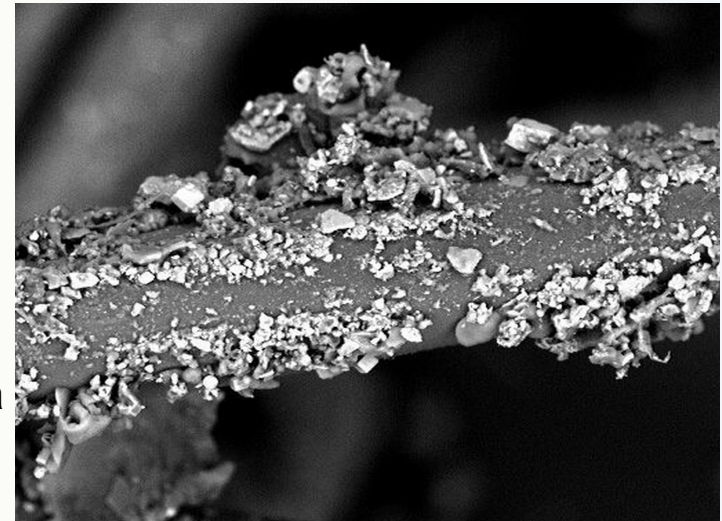


- Волокнистые воздушные фильтры с нефиксированными порами**



## 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.



- Сравнение воздушных фильтров разных типов

## Старые бумажные фильтры

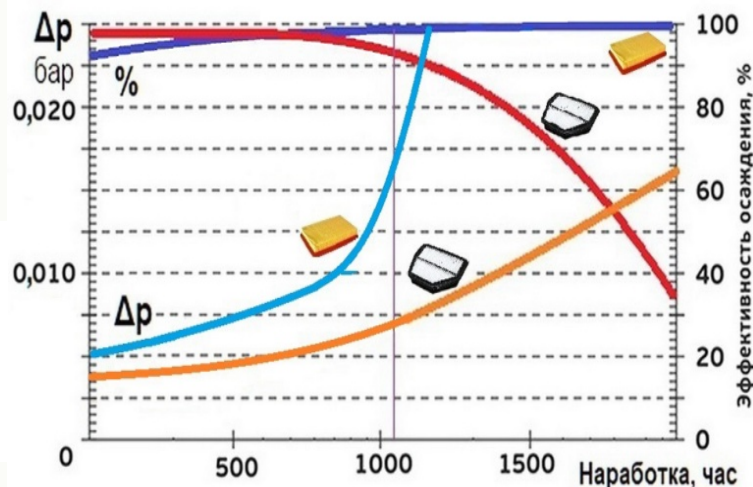
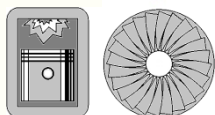
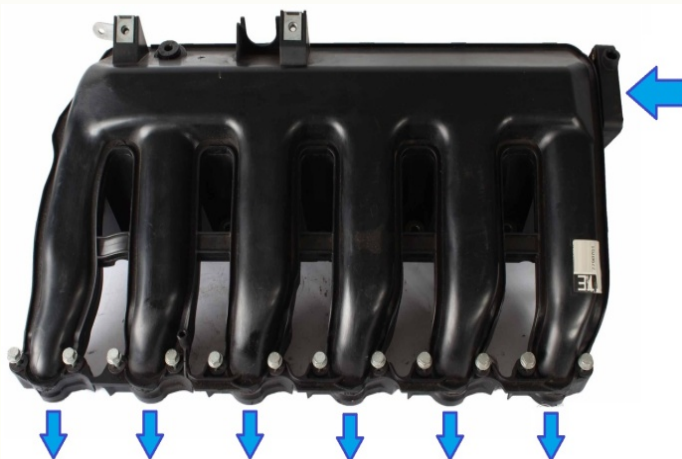
- ❑ в эксплуатации наблюдалось повышение эффективности очистки при увеличении сопротивления.

## Современные волокнистые фильтры

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

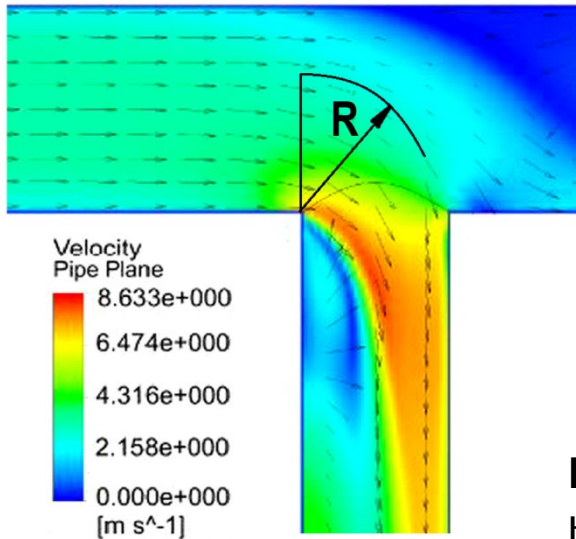


Простой переход с бумажных фильтров на волокнистые при неизменной конструкции двигателя может стать причиной новых неисправностей, которых ранее не встречалось.



Наибольший эффект от центрифугирования частиц следует ожидать при резких поворотах потока с малыми радиусами закругления.

# 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  $\text{SiO}_2$   
Плотность  $\rho_p = 2700$  кг/м<sup>3</sup>  
Частицы равномерно распределены по площади входного сечения



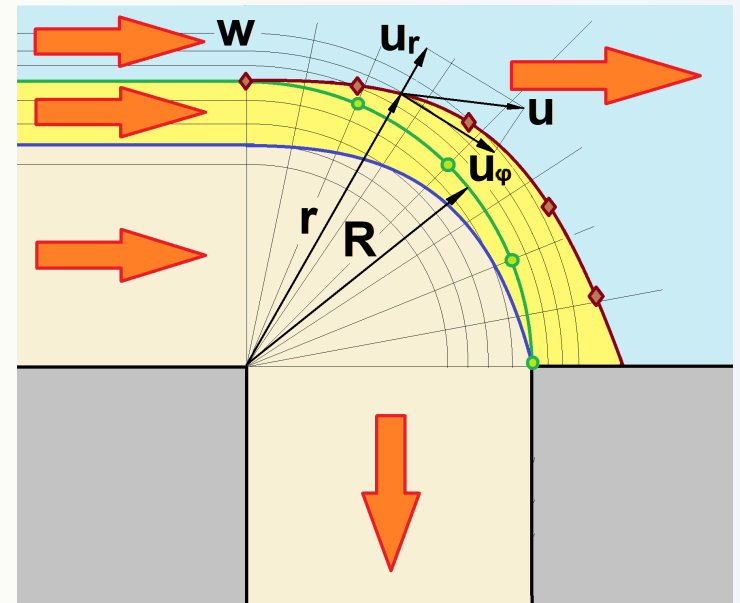
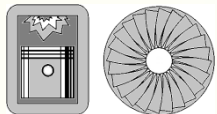
Расчетная схема для частицы при ее движении по криволинейной траектории при разветвлении потока

## 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

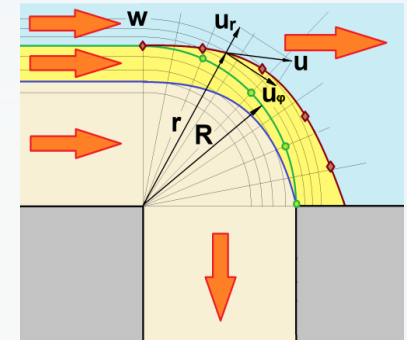
$$m \frac{d\vec{u}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i$$



# 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  $\Delta R$ , 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  $\Delta R$ .

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

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



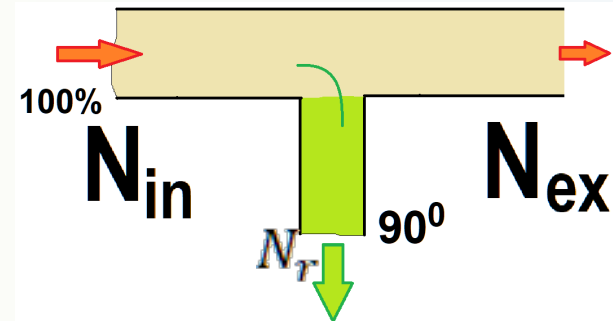
**Начальные условия:**  $\tau = 0 \quad \varphi = 0 \quad u_\varphi = w \quad u_r = 0 \quad r = R$

**Решение** – численное интегрирование простым методом Эйлера:

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

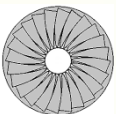
$$r = r + u_r \Delta\tau$$

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



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

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



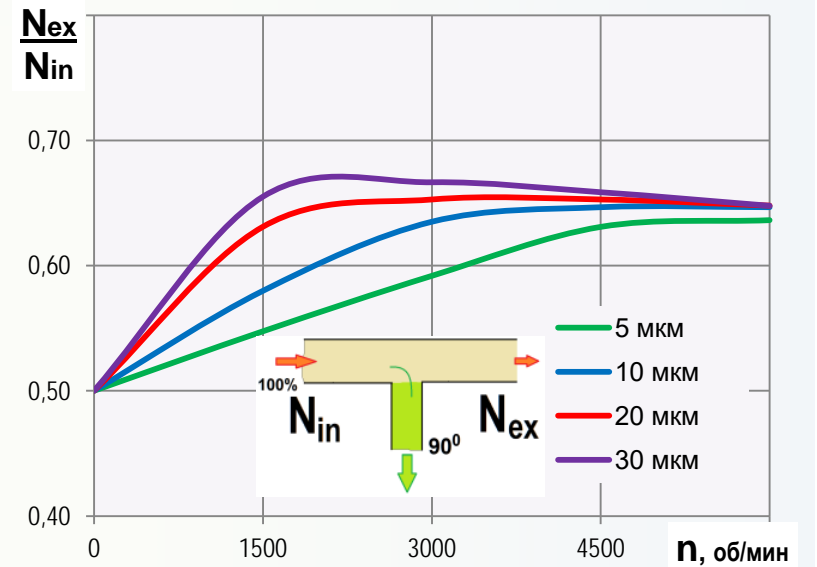
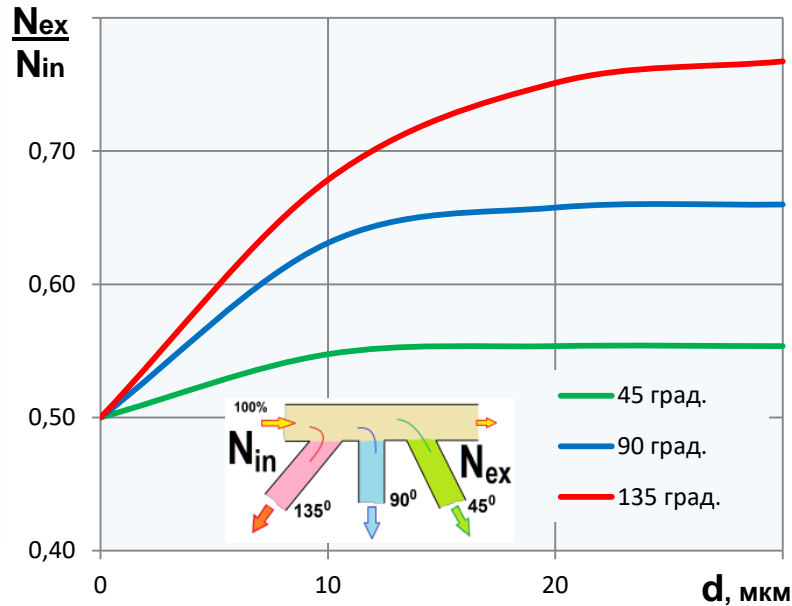


# ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦЫ ПЫЛИ ПО КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ

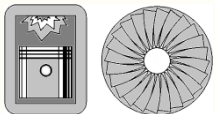
Результаты расчета относительного количества частиц на выходе из прямого канала (к количеству частиц на входе в канал)

- ❑ 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.

$$\rho \omega F = \mu_v V_h \frac{n}{60} \quad \rightarrow \quad n = 300 \omega$$



1. Боковой отвод в воздуховоде 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.

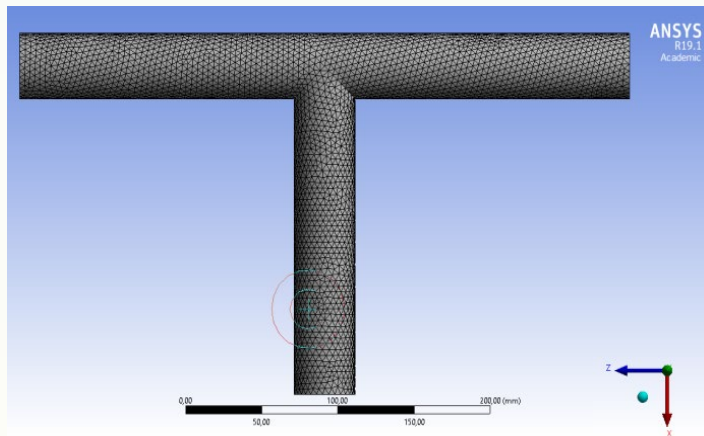


# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ 2-ФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С ОТВОДОМ

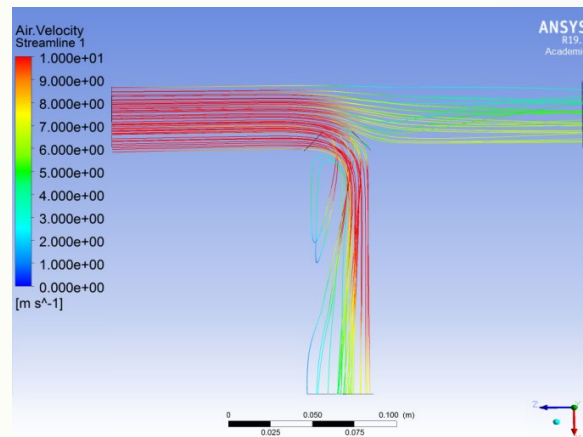
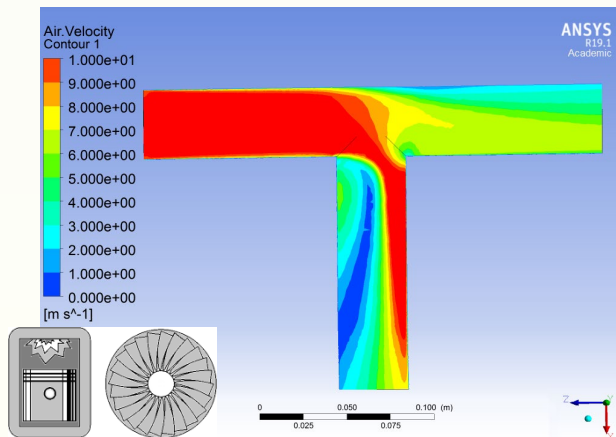
**Цель: оценка достоверности результатов расчета траектории движения частицы сравнением с результатами моделирования 2-фазного течения**



- ❑ Моделирование с помощью программного комплекса ANSYS в версии Student,
- ❑ Те же исходные данные: углы поворота потока в отводе ( $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ), скорости воздуха  $u = 5-20$  м/с), частицы с размерами в диапазоне 5-30 мкм.



- **сетка с 168267** элементами, пограничный слой, k- $\epsilon$  модель турбулентности,
- **граничные условия на входе:** скорость течения воздуха принята одинаковой по входному сечению и направленной к нему по нормали,
- **граничные условия на выходе**, т.е. в выходных сечениях труб (давления) неизвестны, заданы только расходы воздуха,
- поэтапный расчет, на 1-м этапе (в 1-м приближении) расчет делается только для течения воздуха без учета частиц песка.



**Результат 1-го этапа расчета - поля давлений, скоростей, температур, а также линии тока воздуха в разветвляющемся канале.**

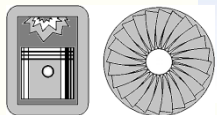
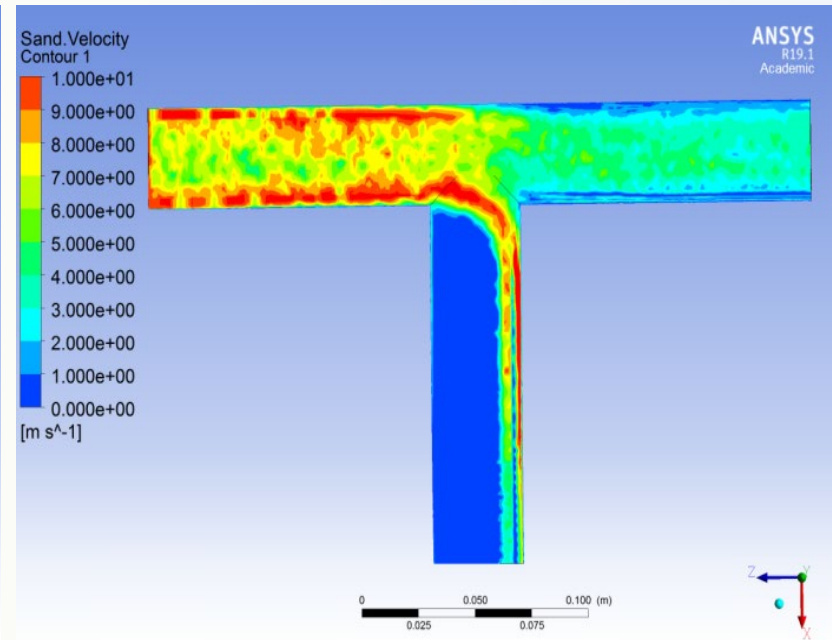
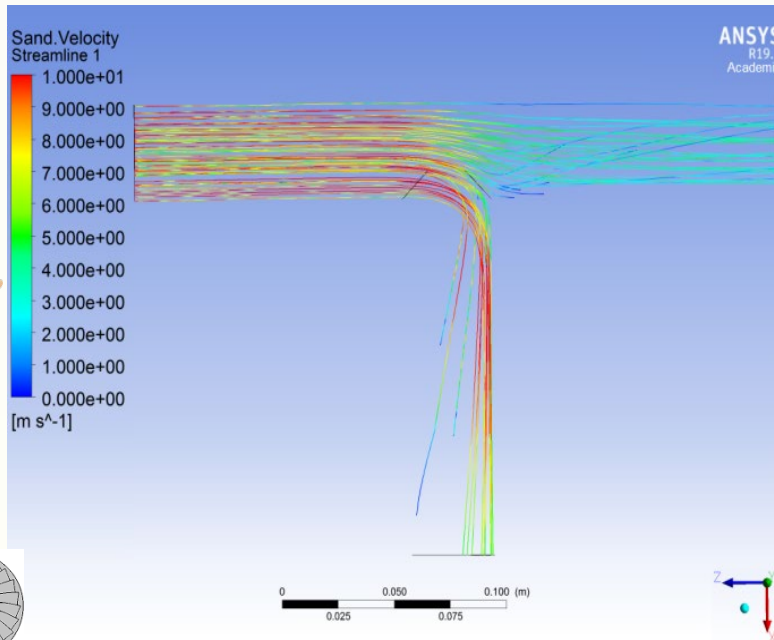


**2-й этап расчета:** – добавление модели 2-фазного течения к модели течения воздуха

- ❑ расчетный модуль **Eulerian** программного комплекса ANSYS,
- ❑ **граничные условия на входе** – равномерное распределение частиц по сечению, скорость частиц равна скорости потока воздуха,
- ❑ **граничные условия на выходе** - давление, полученное при расчете течения воздуха.
- ❑ для твердой дисперсной фазы использовался специальный вариант модели – **Eulerian Granular**.

**Результаты расчета 2-го этапа:**

- траектории движения частиц пыли,
- количество частиц и их скорость (массовый расход пыли) – с помощью встроенной функции расчетного модуля,
- уточненные расходы воздуха в прямом и боковом отводе.



# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ 2-ФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С ОТВОДОМ

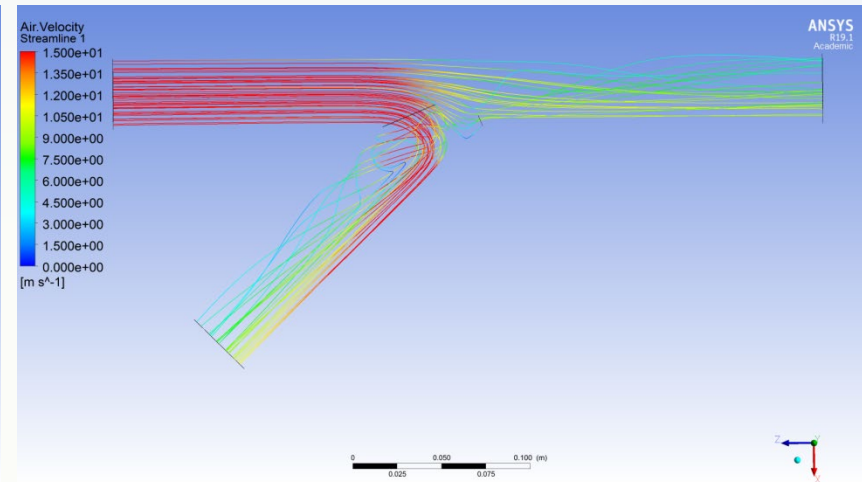
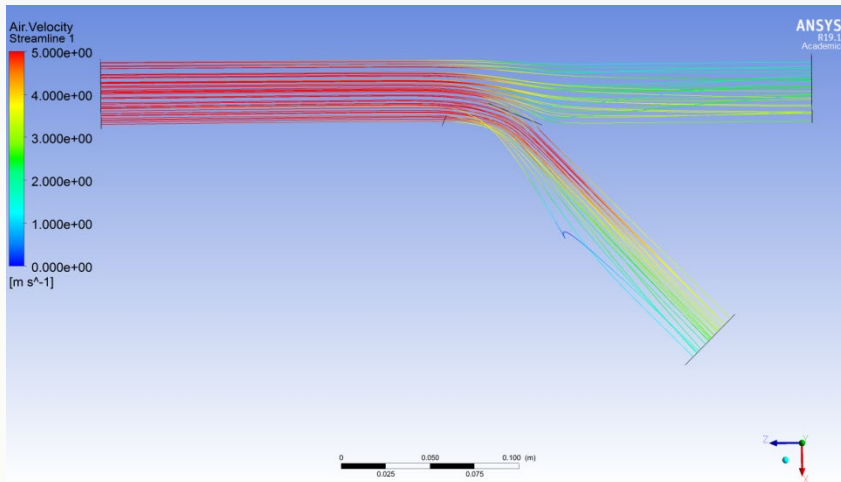


**Влияние инерции частиц на их распределение по каналам:**

**Течение воздуха:**

45°, скорость 5 м/с

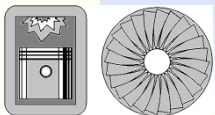
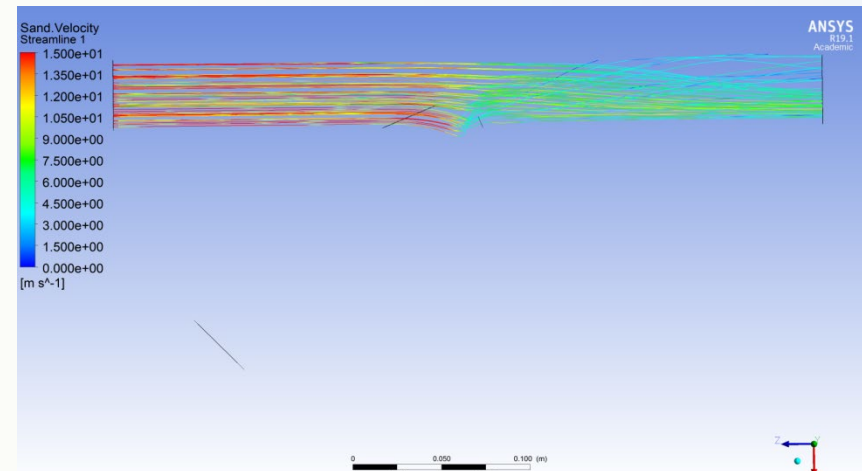
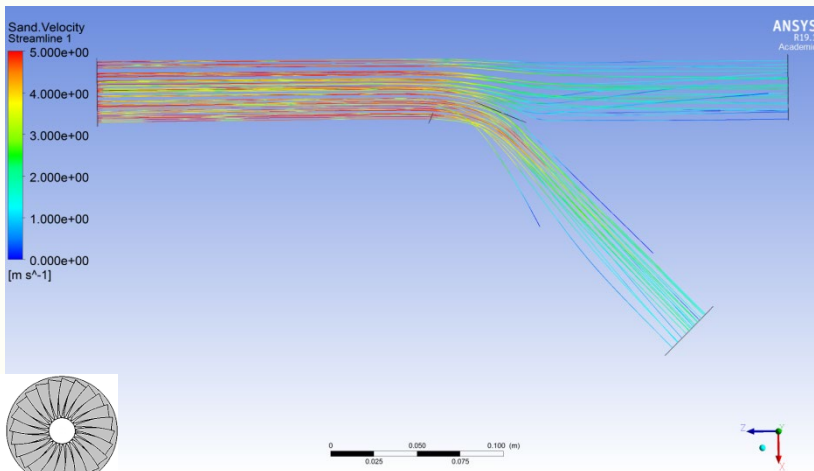
135°, скорость 15 м/с



**Движение частиц:**

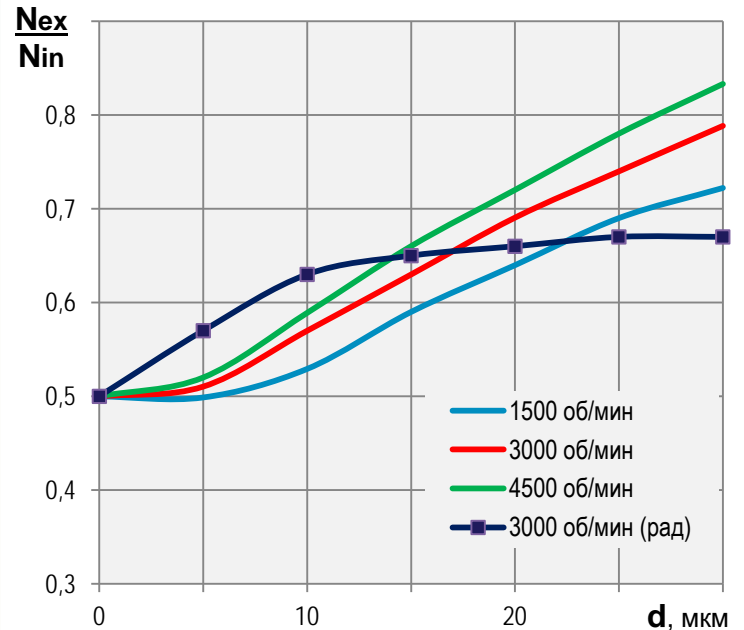
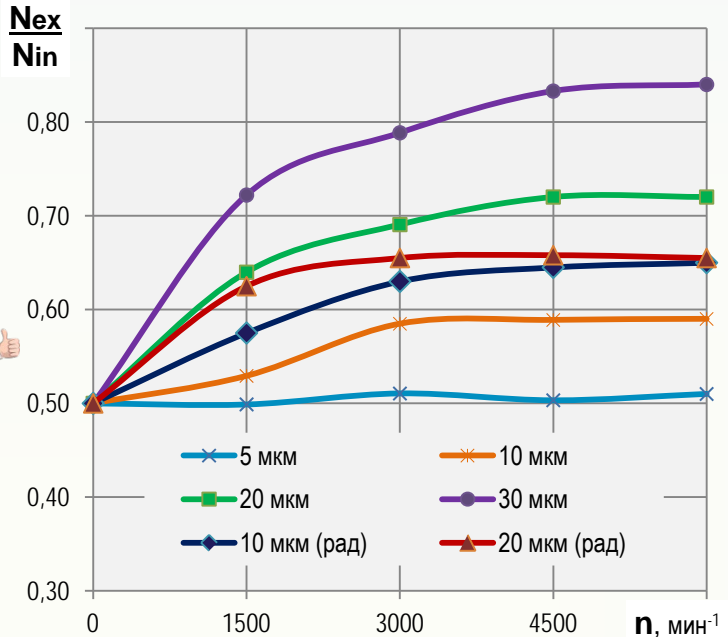
5 МКМ

30 МКМ



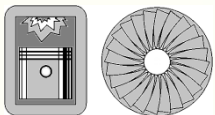
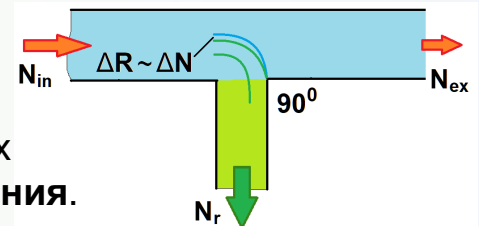
# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ 2-ФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С ОТВОДОМ

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 (для отвода  $90^\circ$ )



1. 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).

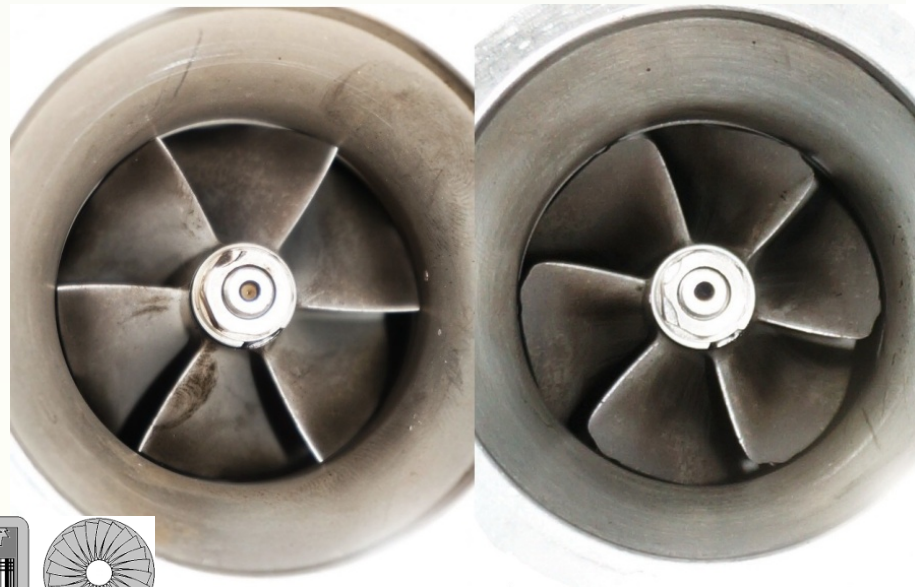
2. Модель движения одиночной частицы дает достоверные результаты только при средних скоростях, углах и размерах частиц – ошибка связана с **переменным радиусом движения**.



# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЮ ПЫЛИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОЛОКНИСТЫХ ВОЗДУШНЫХ ФИЛЬТРОВ

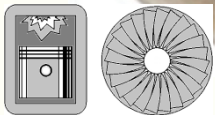
Патрубок с разветвлением потока от воздушного фильтра к турбокомпрессорам правого и левого ряда цилиндров V-образного 8-цилиндрового двигателя:

Избирательный газообразивный износ входных кромок лопаток за 42.000 км пробега автомобиля – локализация видимых повреждений только у одного турбокомпрессора:



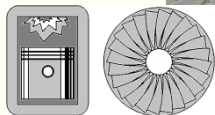
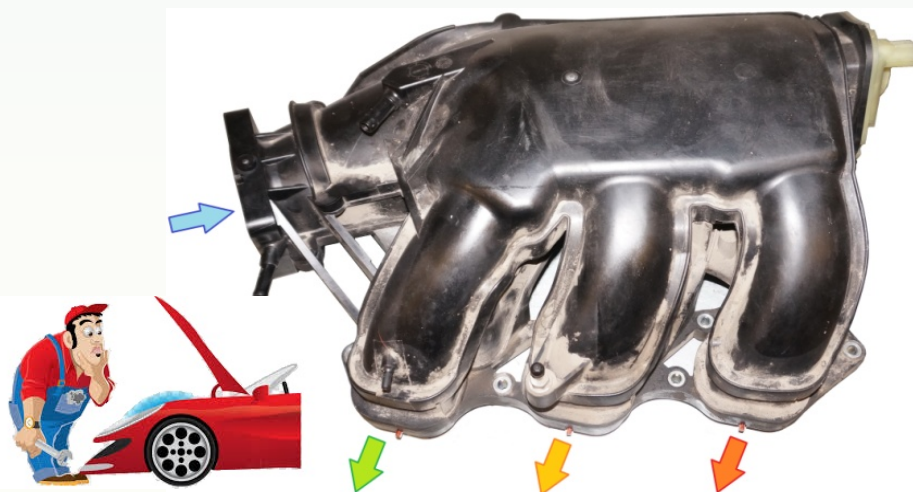
## Результат:

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



# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЮ ПЫЛИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОЛОКНИСТЫХ ВОЗДУШНЫХ ФИЛЬТРОВ

Впускной коллектор с изменяемой длиной каналов V-образного 6-цилиндрового бензинового двигателя:



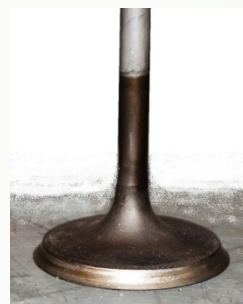
Избирательный газоабразивный износ деталей поршневой группы и клапанного механизма (80.000 км пробега) – локализация видимых повреждений в одном цилиндре:



**Результат:** сочетание волокнистого воздушного фильтра с впускным коллектором, имеющим очевидное и традиционное, на 1-й взгляд, конструктивное исполнение, непригодно для двигателя в реальных условиях эксплуатации.

# ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета центрифугирования пыли, которая позволяет устанавливать причину наблюдаемого на практике чрезвычайно сильного локального абразивного износа ДВС, что подтверждается как результатами моделирования 2-фазного течения, так и данными реальных исследований причин отказов ДВС.
2. 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.
3. Произвольное изменение одного элемента конструкции ДВС (воздушный фильтр), даже если этот элемент сам по себе несет какие-то преимущества, может спровоцировать чрезвычайно сильное падение надежности и ресурса создаваемого или модернизируемого двигателя, если пренебречь центрифугированием пыли в разветвляющихся каналах.
4. Необходимо не только учитывать процессы центрифугирования пыли при проектировании, но и, возможно, уточнять регламенты обслуживания ДВС.





# Спасибо за внимание!



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



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

