

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛОННЫХ ФИЛЬТРОВ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ

Н. В. Вологодский<sup>1</sup>, А. В. Проневич<sup>1</sup>, А. Б. Яковлев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Омское машиностроительное конструкторское бюро»,  
Россия, 644116, г. Омск, ул. Герцена, 312

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

**Проведено экспериментальное исследование циклонных фильтров различных конструкций. Выявлены параметры, позволяющие повысить степень очистки воздуха от пыли: давление воздуха на входе в фильтр, температура рабочего воздуха, а также диаметр жиклера имитатора потребителя очищенного воздуха и диаметр вентиляционного жиклера. Полученные результаты позволяют повысить надежность работы пневматических агрегатов, уменьшить эрозионный износ их рабочих полостей.**

**Ключевые слова:** авиационный двигатель, пневматические системы, сепарация, центробежный пылеуловитель, степень очистки.

## Введение

В машиностроении, в авиации, в энергетике (связанной со сжиганием углеводородного топлива), в нефтехимии, в коммунальном хозяйстве, при добыче и переработке полезных ископаемых и т. п. отраслях во многих технологических процессах и установках в качестве рабочего тела используется воздух, загрязненный твердыми частицами дыма, пыли и песка [1–6]. Кроме того, сама природа в процессе природных явлений (атмосферных, метеорологических, геологических и др.) способна генерировать неблагоприятные условия окружающей среды для человека и животных, а также промышленных сооружений, установок и аппаратов.

Несмотря на возросшие усилия человечества на решение проблем охраны окружающей среды, в том числе связанных с загрязнением атмосферы, некоторые технологические устройства и энергетические установки требуют для своего использования специально подготовленный воздух с низким содержанием частиц различных органических и неорганических загрязнителей. А это, в свою очередь, требует создания высокоэффективных, компактных и низкокзатратных обеспыливающих очистных устройств.

Известно, что авиационные двигатели и энергетические установки атмосферных летательных аппаратов, в отличие от космических систем, зависят достаточно сильно от условий и параметров окружающей среды. Твердые частицы, содержащиеся в атмосферном воздухе, существенно влияют на работу поршневых и газотурбинных двигателей (ГТД), вспомогательных силовых установок и систем кондиционирования самолетов. Например, наличие пыли в заборном воздухе ГТД вызывает

загрязнение и эрозионный износ проточной части осевого компрессора, особенно лопаток направляющего аппарата первых ступеней компрессора, рабочих лопаток турбины, в связи с чем ресурс вертолетных ГТД примерно на порядок ниже ресурса маршевых двигателей самолетов. Также попадание посторонних частиц с воздухом в пневматические агрегаты ГТД может привести к их загрязнению, абразивному износу и к отказу. В связи с этим пневматические агрегаты, эксплуатирующиеся по техническому состоянию (например, в самолетных двигателях Д-36, Д-18, Д-436), имеют по техническому состоянию наработку до капитального ремонта 6000, а у вертолетных двигателей Д-136 — до 1000 часов. Применение износостойких покрытий отчасти решает эту проблему и ведет к удорожанию изделия. Таким образом, для надежной и стабильной работы пневматических агрегатов воздух, подаваемый на их питание, необходимо обеспылить и осушить [7], для чего на летательных аппаратах применяют специальные устройства кондиционирования воздуха (фильтры, пылеуловители, сепараторы, циклоны и др.).

На засорение и скорость абразивного износа регулировочных элементов, жиклеров и сопел датчиков отношения давления существенное влияние оказывают механические характеристики материала, состав пыли, её концентрация, расход, давление и температура рабочего воздуха.

Исходя из вышеизложенного, можно констатировать, что в настоящее время очистка от пыли рабочего воздуха, подаваемого на питание пневматических агрегатов, является одним из важных путей повышения ресурса и надежности авиационных двигателей и энергетических установок летательных аппаратов.

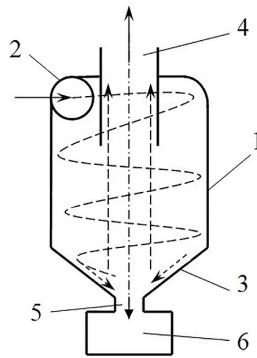


Рис. 1. Схема противоточного циклонного фильтра:  
 1 — цилиндрическая часть; 2 — тангенциальное сопло;  
 3 — коническая часть; 4 — выхлопной патрубок;  
 5 — пылевывпускное отверстие; 6 — пылеосадочная камера  
 Fig. 1. Scheme of counter-current cyclone filter:  
 1 — cylindrical part; 2 — tangential nozzle; 3 — conical part;  
 4 — exhaust pipe; 5 — dust outlet; 6 — dust chamber

### Постановка задачи

Пылеуловители могут использовать два метода отделения пыли из воздушного потока: сухой (отделенные от воздуха частицы осаждаются на сухую поверхность) и мокрый (отделение частиц от воздушного потока осуществляется с помощью жидкостей). По принципу действия пылеуловители подразделяются на гравитационные, инерционные, фильтрационные, электрические. Различают и способы обеспыливания:

- физические способы, а именно механический (аэродинамический, гидродинамический, фильтрационный), электрический, магнитный, акустический, оптический, ионизирующий, термический;
- химические способы, в том числе физико-химический, биохимический, физико-биохимический.

Каждый из указанных способов имеет определенную область применения и широту использования. В своей основе они базируются на одном из следующих процессов обеспыливания: осаждения, коагуляции, удаления, сжигания и улавливания.

В авиационных ГТД при очистке рабочего воздуха для пневматических агрегатов применяют сухой метод, работоспособный при температурах рабочего воздуха, отбираемого от ГТД до 600 °С, а именно сетчатые и центробежные (циклонные) фильтры. Сетчатые фильтры обычно требуют периодической очистки или замены при проведении регламентных работ по двигателю. В этом отношении циклонные фильтры более удобны, так как не требуют очистки, и поэтому проще в обслуживании. Также при наличии в системах воздуха высокого давления для основного потребителя очистка с помощью циклонного фильтра становится более эффективной. Применяют и двухступенчатую очистку: циклонный фильтр грубой очистки и сетчатый фильтр тонкой очистки. Циклонный фильтр удаляет около 98 % пыли, а сетчатый фильтр — оставшуюся часть, что увеличивает его ресурс до замены (очистки) и снижает эксплуатационные расходы. Повышая эффективность очистки воздуха циклонным фильтром, можно совсем избавиться от сетчатого фильтра, тем самым упростить конструкцию, снизить ее стоимость и эксплуатационные расходы.

В связи с вышеизложенным основной целью работы являлось исследование циклонных фильтров для выявления степени влияния различных параметров на эффективность очистки воздуха от пыли, и поиск путей, позволяющих усовершенствовать их конструкцию.

### Теория

Принцип действия циклонного фильтра основан на выделении частиц пыли из газового потока под воздействием центробежных сил, возникающих при вращении потока в корпусе устройства. На рис. 1 показан так называемый противоточный циклонный фильтр. Корпус устройства состоит из цилиндрической 1 и конической 3 частей. Запыленный воздух подается в верхней цилиндрической части через тангенциальное сопло (патрубок) 3, очищенный — удаляется через выхлопной патрубок 4, расположенный в верхнем торце цилиндрической части, а частицы пыли в результате действия центробежных сил отбрасываются на стенки корпуса и выпадают из потока. Вторичный поток, направленный вдоль конической стенки, захватывает отброшенную к стенке пыль и направляет ее вниз через пылевывпускное отверстие 5 к пылеосадительной камере 6.

К основным характеристикам, определяющим эффективность работы циклонного фильтра, можно отнести:

- степень очистки воздуха от пыли  $K$  [%], определяемую следующим образом

$$K = \frac{Z_{ВХ} - Z_{ВЫХ}}{Z_{ВХ}} 100\%, \quad (1)$$

где  $Z_{ВХ}$ ,  $Z_{ВЫХ}$  — концентрации [мг/м<sup>3</sup>] пыли в воздухе до очистки (на входе) и после (на выходе) соответственно;

- фракционную эффективность, т.е. долю уловленной пыли по каждой фракции,  $K_{\Phi,i}$  равную

$$K_{\Phi,i} = \frac{Z_{ВЫХ,i}}{Z_{ВХ,i}},$$

где  $Z_{ВХ,i}$ ,  $Z_{ВЫХ,i}$  — концентрации пыли  $i$ -й фракции на выходе и входе соответственно;

— общую степень эффективности фильтра  $K_{\Phi\Sigma}$

$$K_{\Phi\Sigma} = \frac{z_{\text{вх.1}} \cdot K_{\Phi,1} + z_{\text{вх.2}} \cdot K_{\Phi,2} + \dots + z_{\text{вх.п}} \cdot K_{\Phi,п}}{z_{\text{вх.1}} + z_{\text{вх.2}} + \dots + z_{\text{вх.п}}};$$

— производительность, т.е. объемный расход очищаемого воздуха в час [ $\text{м}^3/\text{ч}$ ].

В настоящий момент исследования в области повышения эффективности циклонных фильтров, в основном, направлены на разработку мероприятий по совершенствованию их конструкции и определению оптимальных геометрических параметров в широком диапазоне давлений и температуры газа на входе в устройство [4, 8]. Основными параметрами при исследовании эффективности очистки воздуха циклонными фильтрами были выбраны:

- 1) избыточное давление воздуха на входе  $p_{\text{вх}}$  — от 2 до 40 кгс/см<sup>2</sup>;
- 2) температура воздуха на входе  $T_{\text{вх}}$  — от 20 до 600 °С;
- 3) площадь отверстия  $F_B$  или определяющий ее диаметр  $D_B$  вентиляционного жиклера — от 0,5 до 2 мм;
- 4) площадь отверстия  $F_H$  или определяющий ее диаметр  $D_H$  жиклера имитатора потребителя очищенного воздуха — от 1 до 4 мм;
- 5) рабочее тело — воздух с пылью (размер частиц от 17 до 90 мкм) при концентрации пыли от 0,25 до 6 г/м<sup>3</sup>.

Критерием эффективности выбрана степень очистки воздуха  $K$ , определяемая по выражению (1), для чего рассчитывались

$$z_{\text{вх}} = \frac{M_0}{Q_{\Sigma} \cdot t},$$

$$z_{\text{вых}} = \frac{M_2}{Q_H \cdot t},$$

$$Q_{\Sigma} = Q_H + Q_B = \frac{G_H}{\rho_B} + \frac{G_B}{\rho_B},$$

$$G_H = \mu_H \cdot p_{\text{вх}} \cdot F_H \sqrt{\frac{2}{RT_{\text{вх}}} \frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}};$$

$$G_B = \mu_B \cdot p_{\text{вх}} \cdot F_B \sqrt{\frac{2}{RT_{\text{вх}}} \frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}};$$

$$\mu_H = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon_{\text{вхИ}}}},$$

где  $M_0$  — масса пыли, засыпанной в дозатор;  $M_2$  — масса пыли, уловленная фильтром тонкой очистки;  $Q_{\Sigma}$  — объемный расход воздуха, приведенный к нормальным атмосферным условиям, прошедший через циклонный фильтр.

Поскольку на рабочих режимах циклонного фильтра всегда выполняется условие  $p_{\text{вх}}/p_H > 2$  ( $p_H$  — давление окружающей среды), для расчета расходов воздуха через циклонный фильтр использованы зависимости для критических расходов:  $Q_H$  ( $G_H$ ) — объемный (массовый) расход, приведенный к нормальным атмосферным условиям, прошедший через жиклер имитатора потребителя очи-

щенного воздуха;  $Q_B$  ( $G_B$ ) — объемный (массовый) расход, приведенный к нормальным атмосферным условиям, прошедший через вентиляционный жиклер;  $t$  — время подачи пыли в процессе испытаний;  $\rho_B$  — плотность воздуха при нормальных атмосферных условиях;  $\mu_H$  — коэффициент расхода жиклера имитатора потребителя очищенного воздуха;  $\epsilon_{\text{вхИ}}$  — коэффициент сопротивления на входе жиклера имитатора (принят  $\epsilon_{\text{вхИ}} = 0,1$  [9]);  $\mu_B$  — коэффициент расхода вентиляционного жиклера (определен экспериментально  $\mu_B = 0,61$ );  $R$  — удельная газовая постоянная воздуха;  $k$  — показатель адибаты воздуха.

Для сравнения результатов экспериментальных исследований был введен обобщающий безразмерный параметр

$$\Psi = \frac{p_{\text{вх}}(F_H + F_B) \cdot \tau \cdot t}{M_0 \cdot d},$$

где  $\tau$  — величина времени релаксации частицы [10]

$$\tau = \frac{d^2}{18 \cdot \mu} \rho_{\text{п}} \quad \text{и} \quad \mu = k_r \frac{T_{\text{вх}}^{3/2}}{T_{\text{вх}} + c_r}.$$

Здесь  $\rho_{\text{п}}$  — плотность частицы пыли;  $\mu$  — динамическая вязкость воздуха;  $d$  — средний диаметр сепарируемых частиц пыли;  $k_r$ ,  $c_r$  — постоянные газа [11].

## Результаты экспериментов

Для исследования изменения коэффициента очистки воздуха  $K$  циклонных фильтров в АО «ОМКБ» был спроектирован специальный испытательный стенд (рис. 2), в котором имеется возможность регулирования концентрации  $z_{\text{вх}}$  подаваемой пыли с различным размером частиц  $d$ , давление воздуха  $p_{\text{вх}}$  в циклонный фильтр, температуру рабочего воздуха  $T_{\text{вх}}$ , а также изменять диаметры жиклера имитатора потребителя очищенного воздуха  $D_H$  и вентиляционного жиклера  $D_B$ .

Испытаниям подвергались циклонные фильтры 4879 (рис. 3), 4881 (рис. 4) и их макеты 4879М и 4881М (рис. 5).

Циклонный фильтр 4879 (рис. 3) представляет собой сборную конструкцию из улитки подвода газа 2, цилиндрической части 1 с тангенциальными соплами, выполненной воедино с небольшой конической частью, присоединяющимися к конической части фильтром крупных частиц 3 и вентиляционным жиклером 5, а к цилиндрической — штуцером выхода очищенного газа 4.

Циклонный фильтр 4881 (рис. 4) — это сборная конструкция из улитки подвода газа 2, цилиндрической части 1 с тангенциальными соплами, присоединяющимися штуцером выхода очищенного газа 4 с соплами антизакрутки, корзиной антизавихрителем 7, установленной в конической части, фильтром крупных частиц 6 и вентиляционным жиклером 5.

Циклонные фильтры 4879М (рис. 5а) и 4881М (рис. 5б) — это упрощенные макеты соответствующих вышеописанных фильтров.

В результате проведенных испытаний фильтров были получены зависимости (рис. 6–11) степени очистки воздуха  $K$  от:

- 1) изменения расхода очищенного воздуха (отношения площади жиклера имитатора на выходе

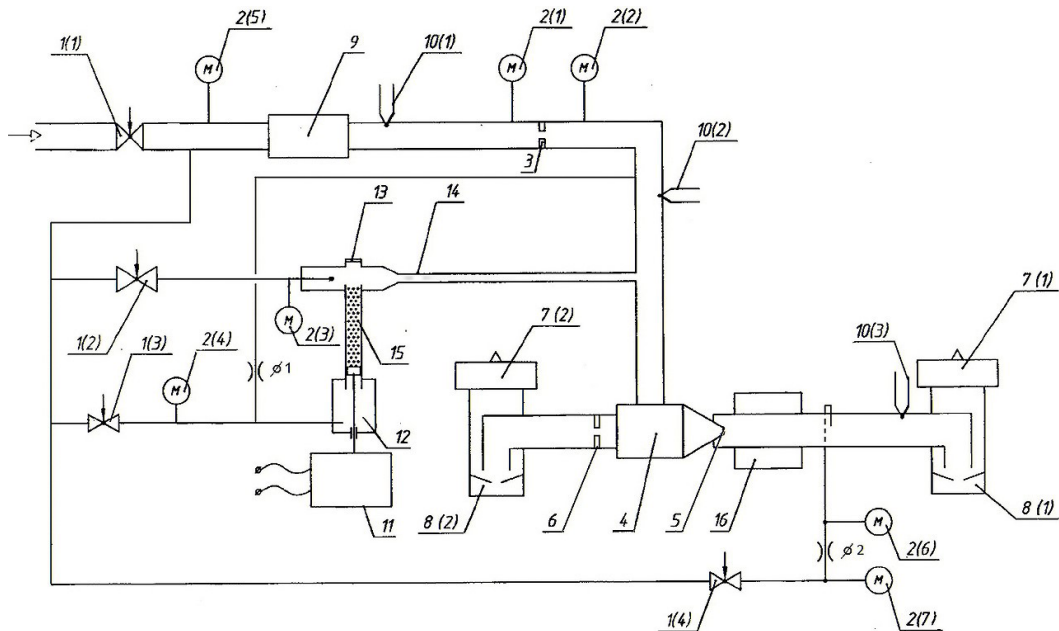


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

- 1(1), 1(2) — вентиль регулирующий; 2(1)...2(7) — средства измерения давления; 3 — мерный жиклер;  
 4 — циклонный фильтр; 5 — вентиляционный жиклер; 6 — жиклер имитатор потребителя очищенного воздуха;  
 7(1), 7(2) — пылесос; 8(1), 8(2) — фильтр тонкой очистки; 9 — нагреватель воздуха;  
 10(1)...10(3) — средства измерения температуры; 11 — шаговый двигатель и генератор специальных импульсов с пультом управления; 12 — устройство подачи частиц песка в проточную часть трубы (поз. 14);  
 13 — люк загрузки песка; 14 — труба; 15 — пыль; 16 — теплообменник

Fig. 2. Scheme of the experimental installation:

- 1(1), 1(2) — control valve; 2(1)...2(7) — pressure measuring instruments; 3 — dimensional jet; 4 — cyclone filter;  
 5 — ventilation jet; 6 — jet simulator of the purified air consumer; 7(1), 7(2) — vacuum cleaner; 8(1), 8(2) — fine filter;  
 9 — air heater; 10(1)...10(3) — temperature measuring instruments;  
 11 — stepper motor and special pulse generator with control panel;  
 12 — device for feeding sand particles to the flow part of the pipe (pos. 14);  
 13 — sand loading hatch; 14 — pipe; 15 — dust; 16 — heat exchanger

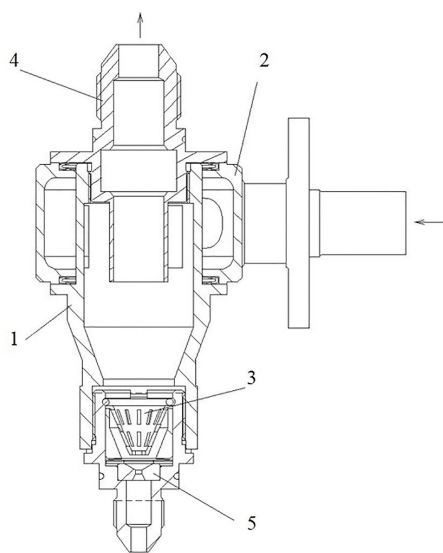


Рис. 3. Схема циклонного фильтра 4879:

- 1 — цилиндрическая часть с тангенциальными соплами, выполненная воедино с конической частью;  
 2 — улитка подвода газа; 3 — фильтр крупных частиц;  
 4 — штуцер выхода очищенного газа;  
 5 — вентиляционный жиклер

Fig. 3. Scheme of the cyclone filter 4879:

- 1 — cylindrical part with tangential nozzles, made together with a conical part; 2 — gas supply snail;  
 3 — filter of large particles;  
 4 — connection to the outlet of the purified gas; 5 — vent jet

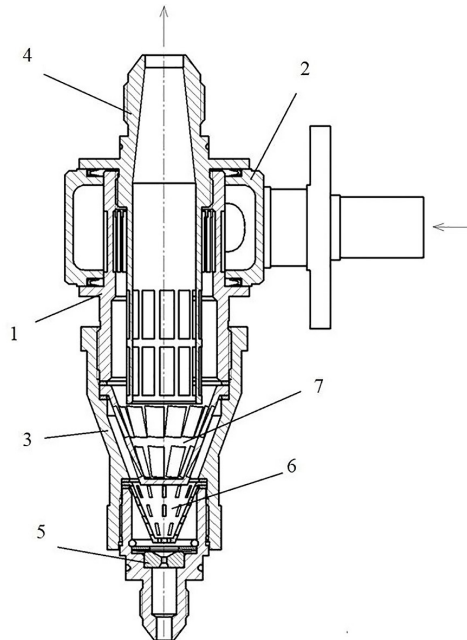


Рис. 4. Схема циклонного фильтра 4881:

- 1 — цилиндрическая часть с тангенциальными соплами;  
 2 — улитка подвода газа; 3 — коническая часть;  
 4 — штуцер выхода очищенного газа с соплами антизакрутки; 5 — вентиляционный жиклер;  
 6 — фильтр крупных частиц; 7 — корзина-антизавихритель

Fig. 4. Scheme of the cyclone filter 4881:

- 1 — cylindrical part with tangential nozzles;  
 2 — gas supply snail; 3 — conical part; 4 — purified gas outlet fitting with anti-twist nozzles; 5 — ventilation jet;  
 6 — large particle filter; 7 — anti-swirl basket

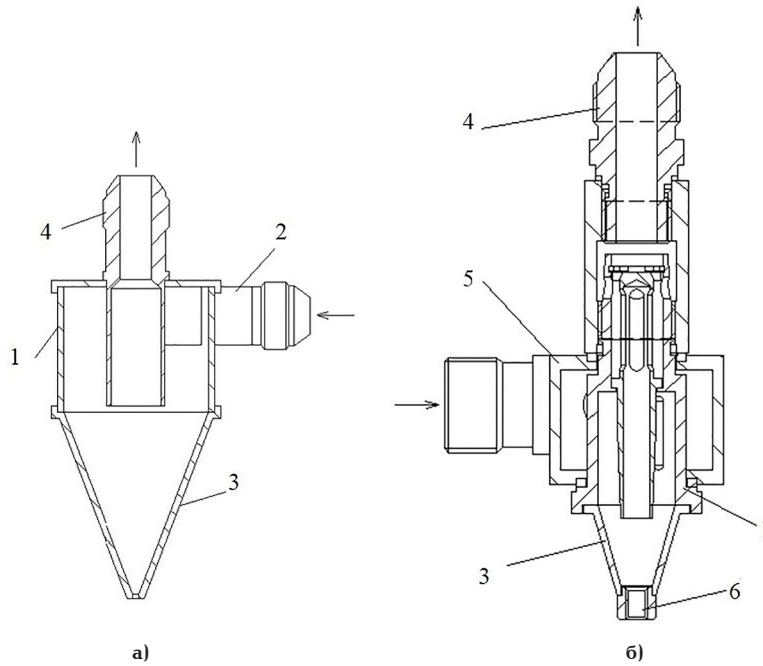


Рис. 5. Схемы макетов циклонных фильтров 4879М (а) и 4881М (б):  
 1 — цилиндрическая часть; 2 — тангенциальный подвод; 3 — коническая часть;  
 4 — штуцер выхода очищенного газа; 5 — улитка подвода газа; 6 — вентиляционный жиклер  
 Fig. 5. Schemes of models cyclone filters 4879M (a) and 4881M (b):  
 1 — cylindrical part; 2 — tangential supply; 3 — conical part;  
 4 — outlet connection of the purified gas; 5 — gas supply snail; 6 — vent jet

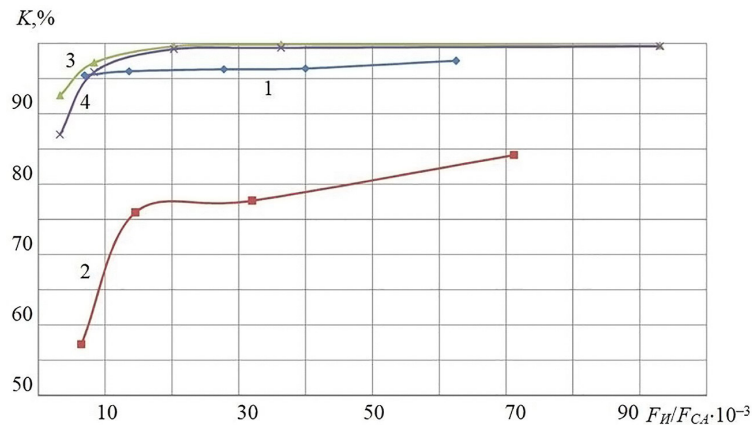


Рис. 6. График зависимости степени очистки воздуха  $K$  от отношения площади жиклера имитатора на выходе очищенного воздуха к площади соплового аппарата улитки подвода воздуха  $F_H/F_{CA}$  при изменении расхода очищенного воздуха:  
 1 — циклонный фильтр 4879М; 2 — циклонный фильтр 4881М; 3 — циклонный фильтр 4879; 4 — циклонный фильтр 4881  
 Fig. 6. Graph of the dependence of the degree of air purification  $K$  on the ratio of the area of the simulator jet at the outlet of the purified air to the area of the nozzle of the air inlet snail  $F_H/F_{CA}$  when the flow rate of the purified air changes:  
 1 — cyclone filter 4879M; 2 — cyclone filter 4881M; 3 — cyclone filter 4879; 4 — cyclone filter 4881

очищенного газа к площади соплового аппарата улитки подвода газа  $F_H/F_{CA}$ ;

2) изменения концентрации пыли (обобщающего безразмерного параметра  $\Psi$ );

3) изменения расхода вентиляционного воздуха (отношения площади вентиляционного жиклера к площади соплового аппарата улитки подвода газа  $F_B/F_{CA}$ );

4) изменения давления воздуха на входе в фильтр (числа Рейнольдса  $Re$  в сопловом аппарате улитки подвода воздуха);

5) изменения размера пыли (обобщающего безразмерного параметра  $\Psi$ );

б) изменения температуры воздуха на входе в фильтр (числа  $Re$  в сопловом аппарате улитки подвода воздуха).

### Обсуждение результатов

Полученные зависимости позволяют сформулировать следующие умозаключения.

1. Из рис. 6 видно, что циклонные фильтры 4879 и 4881 имеют существенно лучшие коэффициенты очистки, чем их прототипы 4879М и 4881М. Улучшение было достигнуто за счет изменения геометрии соплового аппарата, а именно

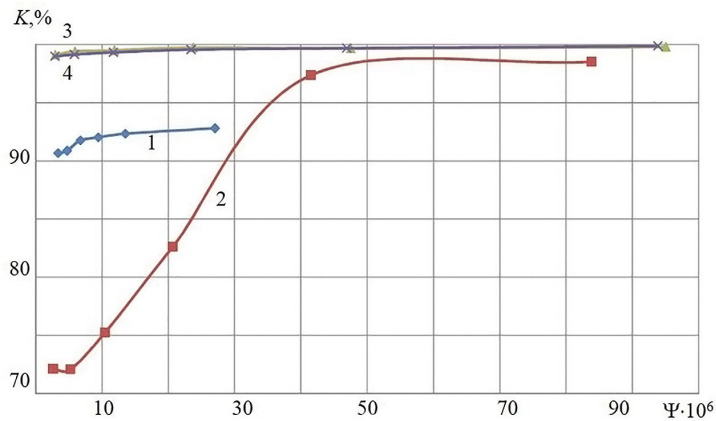


Рис. 7. График зависимости степени очистки воздуха  $K$  от обобщающего безразмерного параметра  $\Psi$  при изменении концентрации пыли: 1 — циклонный фильтр 4879М; 2 — циклонный фильтр 4881М; 3 — циклонный фильтр 4879; 4 — циклонный фильтр 4881  
 Fig. 7. Graph of the dependence of the degree of air purification  $K$  on the generalized dimensionless parameter  $\Psi$  when the dust concentration changes: 1 — cyclone filter 4879М; 2 — cyclone filter 4881М; 3 — cyclone filter 4879; 4 — cyclone filter 4881

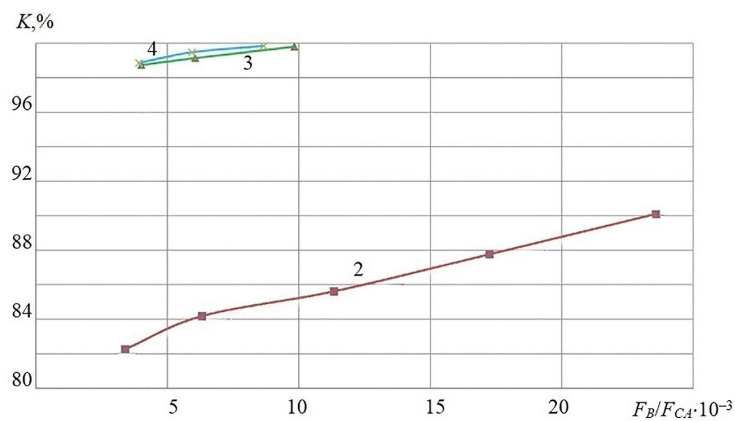


Рис. 8. График зависимости степени очистки воздуха  $K$  от отношения площади вентиляционного жиклера к площади соплового аппарата улитки подвода воздуха  $F_B/F_{CA}$  при изменении расхода вентиляционного воздуха: 2 — циклонный фильтр 4881М; 3 — циклонный фильтр 4879; 4 — циклонный фильтр 4881  
 Fig. 8. Graph of the dependence of the degree of air purification  $K$  on the ratio of the area of the ventilation jet to the area of the nozzle of the air supply snail  $F_B/F_{CA}$  when the ventilation air flow rate changes: 2 — cyclone filter 4881М; 3 — cyclone filter 4879; 4 — cyclone filter 4881

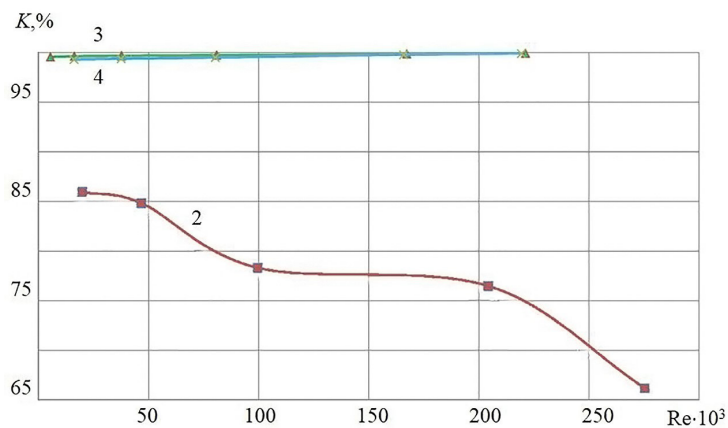


Рис. 9. График зависимости степени очистки воздуха  $K$  от числа Рейнольдса  $Re$  в сопловом аппарате улитки подвода воздуха при изменении давления на входе в фильтр: 2 — циклонный фильтр 4881М; 3 — циклонный фильтр 4879; 4 — циклонный фильтр 4881  
 Fig. 9. Graph of the dependence of the degree of air purification  $K$  on the Reynolds number  $Re$  in the nozzle of the air supply snail when the pressure at the inlet to the filter changes: 2 — cyclone filter 4881М; 3 — cyclone filter 4879; 4 — cyclone filter 4881

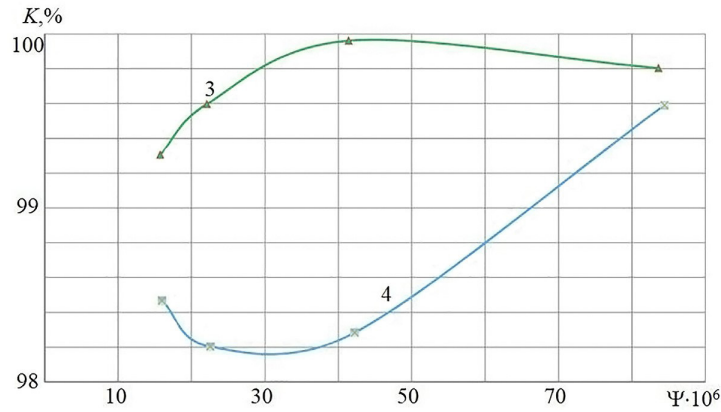


Рис. 10. График зависимости степени очистки воздуха  $K$  от обобщающего безразмерного параметра  $\Psi$  при изменении размера пыли: 3 — циклонный фильтр 4879; 4 — циклонный фильтр 4881  
 Fig. 10. Graph of the dependence of the degree of air purification  $K$  on the generalized dimensionless parameter  $\Psi$  when the dust size changes: 3 — cyclone filter 4879; 4 — cyclone filter 4881

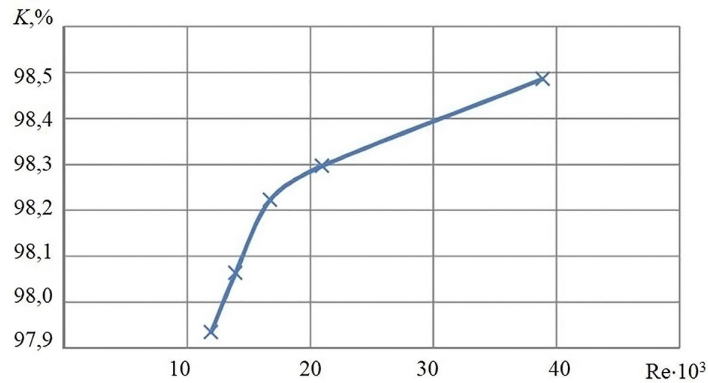


Рис. 11. График зависимости степени очистки воздуха  $K$  от числа Рейнольдса  $Re$  в сопловом аппарате улитки подвода воздуха при изменении температуры на входе в циклонный фильтр 4881  
 Fig. 11. Graph of the dependence of the degree of air purification  $K$  on the Reynolds number  $Re$  in the nozzle of the air supply snail when the temperature changes at the inlet to the cyclone filter 4881

увеличением количества тангенциальных сопел. Так, у фильтра 4879М был один тангенциальный подвод, у 4881М — два, а у 4879 и 4881 их шесть.

2. Ухудшение очистки пыли с увеличением её концентрации (рис. 7) связано с более интенсивным взаимодействием частиц пыли между собой (уменьшением расстояния между ними).

3. Ухудшение сепарации пыли с уменьшением площади вентиляционного отверстия (рис. 8) связано с уменьшением отводимого расхода загрязненного воздуха, т.е. большее количество пыли остается в очищенном воздухе.

4. Из рис. 9 видно, что циклонные фильтры 4879 и 4881 имеют существенно лучшие коэффициенты очистки, чем прототип 4881М. Это связано с меньшей скоростью воздуха в сопловых аппаратах фильтров 4879 и 4881 по сравнению с 4881М.

5. Из рис. 10 видно, что максимальная очистка у циклонного фильтра 4879 достигается при размере частиц 45 мкм, а у 4881 — при 90 мкм. Это связано с различной внутренней геометрией циклонов, различной длиной цилиндрической и конических частей, а также с тем, что с увеличением размеров частиц пыли качество очистки растет.

6. С ростом температуры происходит ухудшение сепарации (рис. 11), что обусловлено снижением скорости воздуха в сопловом аппарате.

### Выводы и заключение

Проведенное исследование показывает, что установка современного циклонного фильтра в систему автоматического управления позволит избежать ложных срабатываний, вызванных загрязнением рабочей полости пневматических агрегатов, уменьшит эрозионный износ их рабочих полостей и увеличит надежность всей системы автоматического управления. На основе полученных экспериментальных данных и рассчитанных параметров циклонных фильтров была рассчитана наработка клапанов перепуска воздуха до ремонта, которая для циклонного фильтра 4879 составила 750 тыс. ч, а для фильтра 4881 — 410,9 тыс. ч.

### Список источников

1. Сулов А. Д., Иванов С. В., Мурашкин А. В. [и др.]. Вихревые аппараты. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.

2. Смутьский И. И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Новосибирск: ВО Наука, 1992. 301 с. ISBN 5-02-030300-3.

3. Boyko T., Skladanyu D., Abramova A., Plashykhin S., Semenyuk N. Analysis of the efficiency of purification of gas flows in a centrifugal filter // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2016. Т. 2, № 10 (80). С. 4–9.

4. Замалиева А. Т., Зиганшин М. Г. Повышение энергетической и экологической эффективности систем газоочистки на ТЭС // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 9. С. 143–153. DOI: 10.18799/24131830/2019/9/2263.

5. Дмитриев А. В., Дмитриева О. С., Салахова Э. И. [и др.]. Оценка эффективности прямоугольных сепараторов для улавливания частиц из потоков газа // Вестник Технологического университета. 2018. Т. 21, № 11. С. 59–62.

6. Яковлев А. Б. Закрученные потоки в промышленности // Омский научный вестник. 1999. № 6. С. 51–53.

7. Яковлев А. Б. Разработка вихревых аппаратов осушки сжатого воздуха для систем наземного стартового комплекса // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 2. С. 111–116. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-2-111-116.

8. Подпороинов Б. Ф., Семенов А. С. Пути повышения эффективности пылеулавливающих аппаратов в системах очистки вентиляционных выбросов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2016. № 11. С. 104–107. DOI: 10.12737/22434.

9. Дмитриев В. Н., Градецкий В. Г. Основы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1973. 360 с.

10. Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха. М.: Стройиздат, 1981. 296 с.

11. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: справочник. М.: Атомиздат, 1968. 484 с.

**ВОЛОГОДСКИЙ Николай Витальевич**, ведущий конструктор, начальник 21-й бригады конструкторского отдела АО «Омское машиностроительное конструкторское бюро».

**ПРОНЕВИЧ Андрей Вадимович**, инженер по испытаниям 21-й бригады конструкторского отдела АО «Омское машиностроительное конструкторское бюро».

**ЯКОВЛЕВ Алексей Борисович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Авиа- и ракетостроение» Омского государственного технического университета.

SPIN-код: 8194-5800

AuthorID (РИНЦ): 488687

ORCID: 0000-0002-1987-2138

AuthorID (SCOPUS): 56503089200

ResearcherID: E-7451-2014

Адрес для переписки: yakovlev@omgtu.ru

#### Для цитирования

Вологодский Н. В., Проневич А. В., Яковлев А. Б. Экспериментальное исследование циклонных фильтров пневматической системы автоматического управления газотурбинного двигателя для увеличения степени очистки // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 3. С. 101–109. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-101-109.

Статья поступила в редакцию 15.07.2020 г.

© Н. В. Вологодский, А. В. Проневич,  
А. Б. Яковлев



# EXPERIMENTAL STUDY OF CYCLONE FILTERS OF PNEUMATIC AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF GAS TURBINE ENGINE FOR INCREASING DEGREE OF PURIFICATION

N. V. Vologodskij<sup>1</sup>, A. V. Pronevich<sup>1</sup>, A. B. Yakovlev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint-stock company «Omsk Machine-Building Design Bureau»,  
Russia, Omsk, Herzen St., 312, 644116

<sup>2</sup>Omsk State Technical University,  
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

An experimental study of cyclone filters of various designs is conducted. The parameters that allow increasing the degree of air purification from dust are identified: air pressure at the filter inlet, working air temperature, as well as the diameter of the nozzle of the purified air consumer simulator and the diameter of the ventilation nozzle. The results obtained make it possible to increase the reliability of pneumatic units and reduce the erosive wear of their working cavities.

**Keywords:** aircraft engine, pneumatic systems, separation, centrifugal dust collector, cleaning degree.

## References

1. Suslov A. D., Ivanov S. V., Murashkin A. V. [et al.]. Vkhrevyye apparaty [Vortex Devices]. Moscow, 1985. 256 p. (In Russ.).
2. Smul'skiy I. I. Aerodinamika i protsessy v vkhrevykh kamerakh [The Aerodynamics and Processes in Vortex Chambers]. Novosibirsk, 1992. 301 p. ISBN 5-02-030300-3. (In Russ.).
3. Boyko T., Skladanyy D., Abramova A., Plashykhin S., Semenyuk N. Analysis of the efficiency of purification of gas flows in a centrifugal filter // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2, no. 10 (80). P. 4–9. (In Engl.).
4. Zamalieva A. T., Ziganshin M. G. Povysheniye energeticheskoy i ekologicheskoy effektivnosti sistem gazo-ochistki na TES [Improve energy and environmental efficiency of gas treatment systems on TPP] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring geosursov. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019. Vol. 330, no. 9. P. 143–153. DOI: 10.18799/24131830/2019/9/2263. (In Russ.).
5. Dmitriyev A. V., Dmitriyeva O. S., Salakhova E. I. [et al.]. Otsenka effektivnosti pryamougol'nykh separatorov dlya ulavlivaniya chastits iz potokov gaza [Assessing the performance of rectangular separators used for trapping the particles from gas flows] // Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta. *Bulletin of the Technological University*. 2018. Vol. 21, no 11. P. 59–62. (In Russ.).
6. Yakovlev A. B. Zakruchennyye potoki v promyshlennosti [Vortex flows in industry] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 1999. No. 6. P. 51–53. (In Russ.).
7. Yakovlev A. B. Razrabotka vkhrevykh apparatov osushki szhatogo vozdukh dlya sistem nazemnogo startovogo kompleksa [Development of vortex compressed air drying devices for ground launch complex systems] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Seriya Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 2. P. 111–116. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-2-111-116. (In Russ.).
8. Podporinov B. F., Seminenko A. S. Puti povysheniya effektivnosti pyleulavlivayushchih apparatov v sistemah ochistki ventilyatsionnykh vybrosov [Ways of increase of efficiency of dust removal devices in cleaning systems for exhaust air] // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova. *Bulletin*

of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 2016. No. 11. P. 104–107. (In Russ.).

9. Dmitriyev V. N., Gradetskiy V. G. Osnovy pnevmavtomatiki [Fundamentals of pneumatic automation]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1973. 360 p. (In Russ.).

10. Pirumov A. I. Obespylivaniye vozdukh [Dedusting of air]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1981. 296 p. (In Russ.).

11. Chirkin V. S. Teplofizicheskiye svoystva materialov yadernoy tekhniki: spravochnik [Thermophysical properties of nuclear engineering materials: handbook]. Moscow: Atomizdat Publ., 1968. 484 p. (In Russ.).

**VOLOGODSKIY Nikolaj Vitalievich**, Lead Designer, Head of 21 Teams of the Design Department, JSC «Omsk Machine-Building Design Bureau».

**PRONEVICH Andrey Vadimovich**, Test Engineer, 21 Teams of the Design Department, JSC «Omsk Machine-Building Design Bureau».

**YAKOVLEV Aleksey Borisovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Aircraft and Rocket Engineering Department, Omsk State Technical University.

SPIN-code: 8194-5800

AuthorID (RSCI): 488687

ORCID: 0000-0002-1987-2138

AuthorID (SCOPUS): 56503089200

ResearcherID: E-7451-2014

Address for correspondence: yakovlev@omgtu.ru

## For citations

Vologodskij N. V., Pronevich A. V., Yakovlev A. B. Experimental study of cyclone filters of pneumatic automatic control system of gas turbine engine for increasing degree of purification // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2020. Vol. 4, no. 3. P. 101–109. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-101-109.

Received July 15, 2020.

© N. V. Vologodskij, A. V. Pronevich, A. B. Yakovlev