



## **ФИЛЬТРАЦИЯ ВОЗДУХА В КОМПРЕССОРНЫХ И ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ**

В газотурбинных и компрессорных установках воздух используется как технологическая среда. В компрессорных установках воздух проходит цикл сжатия и затем направляется на какие-либо технологические нужды. В газотурбинной установке воздух используется для осуществления процесса сгорания газа.

В обоих случаях воздух, как правило, засасываемый из атмосферы, проходит через элементы компрессорных и газотурбинных установок.

Атмосферный воздух всегда содержит какое-то количество пылевых частиц естественного происхождения, связанного с эрозией почв, генерацией различных пылей, растениями (пух, тополей, одуванчиков, пыльца и т.п.). Дополнительное загрязнение воздуха вызывается техногенными факторами, связанными с жизнедеятельностью человека (выхлопы от автотранспорта, вентиляционные выбросы промышленных предприятий и т.д.). Это приводит к тому, что воздух, содержащий пылевые частицы, попадает к движущимся или вращающимся элементам газотурбинных и компрессорных установок. Наличие в перемещаемом воздухе пылевых частиц приводит к абразивному износу и загрязнению элементов газовых турбин и компрессорных установок. Особенно характерен абразивный износ для лопаток газовых турбин, который влечет снижение к.п.д. всей газотурбинной установки.

Загрязнение элементов газотурбинных установок приводит к дополнительным затратам, связанным с разборкой и очисткой этих элементов.

По указанным выше причинам возникает необходимость очистки циклового воздуха в газовых турбинах и воздуха, засасываемого компрессорными установками.

## Очистка воздуха в газотурбинных установках

Как отмечалось ранее, от чистоты воздуха, засасываемого в газотурбинные установки, зависит ресурс этой установки, а также затраты на ее обслуживание.

Для решения этой задачи применяются специальные воздухоочистные устройства ВОУ (ранее имели сокращение КВОУ).

ВОУ представляет собой, как правило, отдельно стоящее сооружение, соединенное коротким воздушным трактом с газотурбинной установкой. Воздухозабор в ВОУ осуществляется на высоте, как правило, не менее 8-10 метров. В верхней части ВОУ размещаются фильтры, которые защищаются от воздействия прямых атмосферных осадков (дождя и снега) с помощью специальных козырьков, жалюзийных каплеуловителей и т.п.

ВОУ также оснащается байпасным клапаном, который открывается в случае увеличения сопротивления системы фильтрации выше установленного значения. Например, на ряде отечественных ВОУ эта величина составляет 700-1000 Па. Это означает, что загрязненная система фильтрации ВОУ (при достижения сопротивления близкого к указанному) должна заменяться или регенерироваться с целью снижения этого сопротивления.

ВОУ отечественного производства, в ряде случаев оснащаются антиобледенительными системами, т.е. системами, способными подогревать воздух, поступающий на очистку для устранения обледенения на 1-ой ступени фильтрации во время колебания температуры атмосферного воздуха около 0 °С и наличие осадков в виде мокрого снега.

Выбор системы фильтрации ВОУ зависит от исходных данных: уровня чистоты воздуха, поступающего в турбину после очистки и уровня запыленности атмосферного воздуха, поступающего на систему фильтрации.

В СССР требования очистки воздуха КВОУ газотурбинных установок регламентировалось ГОСТ 29328-92, в соответствии с которым воздух должен быть очищен до концентрации 0,3 мг/м<sup>3</sup> и от частиц крупнее 20 мкм.

Указанное требование по очистке циклового воздуха является очень грубым, что в дальнейшем повлекло его ужесточение.

Другим требованием, определяющим выбор системы очистки циклового воздуха в газовой турбине, является запыленность воздуха в месте ее расположения.

В рассматриваемом нами случае газотурбинные установки выступают или как энергетические установки (для производства электроэнергии и тепла), или как установки, расположенные на компрессорных станциях, осуществляющих перекачку природного газа по газопроводам.

В условиях России газотурбинные агрегаты, как элементы компрессорных станций, могут располагаться в отдаленных районах Сибири, а также степных районах России, Украины, Белоруссии и Европы. Энергетические газотурбинные установки чаще всего располагаются на территории ТЭЦ, ГРЭС, крупных котельных или промышленных предприятий, когда энергетическая установка компенсирует нехватку электрических мощностей этого предприятия.

Запыленность, дисперсный состав и свойства пылей в этих случаях различны, что должно диктовать различные схемы очистки циклового воздуха для газотурбинных агрегатов.

Так например, запыленность в сельской местности, как правило невелика, и может колебаться от 0,05 до 0,2 мг/м<sup>3</sup>, что в этом случае диктует устройство системы очистки накопительного типа. В ряде случаев эта система может потребовать защиты от крупной "пыли", например, тополиный пух, семена одуванчиков, пыльца других растений, мошकारа и т.п.

Для степных районов, расположенных вне городской черты, среднегодовые запыленности также невелики. Однако, при возникновении пыльных бурь, запыленность может увеличиваться многократно и за несколько часов может приводить к полному выходу системы фильтрации из строя.

В этом случае более целесообразна установка самоочищающихся фильтров с импульсной регенерацией, которая способна справляться с пиковыми всплесками запыленности очищаемого воздуха.

Третьим общим случаем может являться размещение газотурбинной установки на территории промышленного предприятия, где запыленность воздуха может колебаться от 2-х до 5 мг/м<sup>3</sup>. В этом случае выбор системы фильтрации должен производиться с учетом дисперсности и свойств пылей, содержащихся в воздухе этой территории.

Например, при отсутствии аэрозолей сажи и большого количества мелкодисперсных аэрозолей менее 1 мкм может быть использована система фильтрации с самоочищающимися фильтрами. При наличии в воздухе большого количества мелкодисперсных аэрозолей и сажи более предпочтительной может считаться накопительная система фильтрации.

Выбор системы фильтрации является важным моментом и должен проводиться специализированными организациями, т.к. недоучет всех исходных факторов может приводить к необоснованным затратам.

Неучет этих факторов может быть проиллюстрирован на следующем примере. В С.Петербурге на промышленной площадке ТЭЦ для газотурбинной установки была реализована система фильтрации с картриджными самоочищающимися фильтрами. Эксплуатация этой системы показала, что в очень короткие сроки происходила забивка картриджных фильтров, сопровождавшаяся увеличением их аэродинамического сопротивления. Включение в работу регенерирующей системы с импульсной продувкой не приводило к существенному падению сопротивления, что было вызвано проникновением в глубину фильтрующего материала мелкодисперсных аэрозолей, которые удалить в последующем оказалось невозможным.

Эксплуатирующая организация вынуждена была отказаться от этой системы и заменить ее на накопительную систему фильтрации, что в дополнение к начальным капитальным затратам повлекло затраты на реконструкцию.

## Системы фильтрации воздуха в ВОУ

В целом, система фильтрации воздуха в ВОУ газотурбинных агрегатов может быть разделена на две группы: накопительного типа и системы с самоочищающимися патронными (картрижными) фильтрами, регенерация которых производится импульсной продувкой сжатым воздухом.

Необходимо отметить, что накопительная система включает, как правило, несколько ступеней фильтрации, некоторые из которых также могут подвергаться регенерации в ручном режиме после извлечения их из мест установки.

Отдельно могут быть выделены воздухоочистные устройства инерционного типа, к которым относятся циклонные или жалюзийные пылесадители. Они способны улавливать только грубодисперсные пыли и могут выступать в роли защитных устройств основной системы фильтрации от всплесков запыленностей, вызванных какими-либо причинами (например, пыльные бури).

Как указывалось выше, системы фильтрации накопительного типа, как правило, являются многоступенчатыми.

В этой многоступенчатой системе каждая последующая ступень решает задачу защиты предыдущей и, как правило более дорогостоящей, от крупных фракций пыли.

В российской практике в качестве 1 ступени применяются, так называемые влагоотделители, которые решают задачу улавливания атмосферных осадков (дождя и снега). Эти фильтры относятся ко 2-му классу очистки (ГОСТ Р ЕН 779-2007) и способны также улавливать пылевые частицы крупнее 10-15 мкм.

К этим фильтрам могут быть отнесены стекловолокнистые маты одноразового применения толщиной от 50 до 100 мм.

Пенополиуретановые фильтры ППУ с открытыми порами или сетчатые фильтры, например, типа ФяР или ФяВ.

Пенополиуретановые и сетчатые фильтры имеют возможность регенерации, путем их промывки, а сетчатые с металлическими сетками предварительно могут "выжигаться" от тополиного пуха и семян одуванчиков.

В качестве последующей ступени часто используются фильтры класса G4, способные достаточно эффективно улавливать частицы от 5 до 10 мкм. К таким фильтрам относятся гофрированные фильтры (рис. 2) или карманные фильтры (рис.3) класса G4.

В некоторых случаях такая система фильтрации является окончательной и способна защищать турбинную установку только от частиц указанного размера.

В связи с повышением требований чистоты циклового воздуха в дополнение к фильтрам G4 класса стали устанавливаться карманные фильтры класса F7 (рис.10). Такая схема получила широкое распространение в 90-х годах, в т.ч. и в отечественной практике.

В 2000-х годах вместо карманных фильтров начали использовать компактные (рис.4) или складчатые фильтры класса F8 (рис.5).



**Рис.2** Гофрированный фильтр  
типа ФяГ



**Рис.3** Карманный фильтр  
типа ФяК класс G4



**Рис.4** Компактный фильтр  
типа ФяС-К



**Рис.5** Складчатый фильтр  
типа ФяС-Ф

Применение фильтров класса F8 с развитой фильтрующей поверхностью увеличило срок службы фильтров и повысило чистоту циклового воздуха .

Такая система очистки воздуха получила широкое распространение в отечественной и зарубежной практике и широко применяется в настоящее время.

В качестве системы фильтрации накопительного типа используются также и патронные (картриджные) фильтры (рис.6). Эффективность этих фильтров, как правило, соответствует классу F7 или F8.

Система фильтрации, оснащенная самоочищающимися фильтрами, представляет собой цилиндрические или конические картриджные фильтры, изготовленные с использованием специальных материалов и работающими в режиме накопления уловленной пыли (рис.7).



**Рис.6** Патронный (картриджный) фильтр типа ФЭП накопительного типа с предфильтром



**Рис.7** Фильтр патронный (картриджный) типа ФЭП самоочищающийся

Эти патронные фильтрующие элементы оснащены импульсными клапанами, которые при достижении заданного сопротивления и получения сигнала от автоматической системы управления, осуществляют впрыск сжатого воздуха во внутреннюю полость патронного элемента. За счет сильного ударно-встряхивающего эффекта происходит регенерация патронного фильтра от ранее накопленной пыли. Регенерация патронных фильтров может производиться в процессе эксплуатации ВОУ.

Важным элементом этих фильтров является фильтрующий материал, имеющий специальное покрытие на входе воздуха. Это покрытие представляет собой высокоэффективную мембрану (пленку), не позволяющую пылевым частицам проникать в глубину фильтрующего материала, т.е. обеспечивающую, так называемую поверхностную фильтрацию, что позволяет работать патронным фильтрующим элементам сравнительно длительные промежутки времени.

## Очистка воздуха в компрессорных установках

Исторически требования к очистке воздуха в компрессорных установках были невысокие и удовлетворялись использованием простейших ячеяковых сетчатых фильтров типа ФяРБ или ФяВБ. По существующей сегодня классификации эти фильтры относятся к фильтрам грубой очистки класса G2. К преимуществам этих фильтров относится возможность их регенерации путем промывки, а к недостаткам - низкий уровень эффективности очистки.



**Рис.8** Фильтр ФяВБ



**Рис.9** Фильтр HEPA типа ФяС

Эти фильтры были разработаны более 50 лет назад и выпускаются до сегодняшнего дня.

Позднее разработчики компрессорных установок повысили требования к очистке воздуха, в результате чего, например для Казанского завода ОАО Компрессормаш нашим предприятиям поставлялись в начале 90-х годов фильтры ФяС1, соответствующие классу F6-F7. По специальному техническому заданию ОАО Компрессормаш для более сложных задач во второй половине 90-х годов осуществлялась поставка фильтров ФяЛ-2 (снаряжаемых фильтрующим материалом ФПП-15-1,5), которые по эффективности очистки могут быть отнесены к классу H10-H11.

В конце 90-х годов эти фильтры были сняты с производства и заменены на более современные и эффективные фильтры НЕРА типа ФяС с фильтрующими материалами из микротонкого стекловолокна класса H11.

Для ряда Российских предприятий, эксплуатирующих зарубежные компрессорные установки нами была изготовлена 2-х ступенчатая система фильтрации, которая состояла из фильтров грубой очистки типа ФяГ класса G4 (рис.2) и второй ступени фильтров ФяС-Ф класса F7 (рис.5).

## **Опыт использования фильтров ООО "НПП "Фолтер" в различных ВОУ**

В соответствии с требованиями чистоты циклового воздуха, согласно ГОСТ 29328-92 в 80-х - 90-х годах прошлого столетия была разработана система очистки ВОУ, включающая одноступенчатую схему с применением мультициклонов, способных улавливать пылевые частицы размером более 10 мкм.

Необходимо отметить, что указанная система очистки циклового воздуха в соответствии с требованиями ГОСТ 29328-92 и по средствам циклонов не обеспечивает эффективную очистку, что показал наш опыт по реконструкции КВОУ на 2-х газотурбинных агрегатах, установленных на Новополюцком Нефтеперерабатывающем заводе (ПО Нафтан).

Установки, эксплуатировавшиеся на этом предприятии, в качестве очистки имели только прямоточные мультициклоны.

По данным специалистов, эксплуатирующих эти установки отмечалось, что в межцикловые периоды обслуживания, которые составляли 3 месяца, им приходилось достаточно много времени уделять очистке элементов турбины от загрязнения, в связи с чем перед нами была поставлена задача разработки более эффективной системы очистки без существенных габаритных изменений КВОУ.

Данная работа проводилась нами совместно с ЗАО "Энергоавиа", в результате чего была предложена, а затем и реализована 2-х ступенчатая очистка циклового воздуха на этих газотурбинных установках.



**Рис. 10** Фильтр типа ФяК F7

В качестве 1-ой ступени очистки были установлены гофрированные фильтры ФяГ класса G4 (рис.2), а в качестве 2-ой - карманные фильтры ФяК класса F7 (рис.10).

После реализации этой фильтрующей системы по данным специалистов, обслуживающих эти установки, отпала необходимость постоянной очистки всего воздушного тракта.

Этот опыт показал, что использованные в ВОУ в качестве системы очистки только циклонов является недостаточным, а реализованная 2-х ступенчатая система позволила добиться высокого качества очистки.

Совместно с ОАО НПО ЦКТИ нами осуществлялась поставка сетчатых фильтров грубой очистки воздуха ФяВБ на ВОУ ГТЭ-110 Ивановской ГРЭС, которые были использованы для очистки байпасного воздуха, а также сетчатых фильтров ФяРБ для ВОУ авиадвигателя Д-30, установленного на передвижную ж/д платформу для обдува ж/д путей. Аналогичное решение с использованием сетчатых фильтров ФяР нами было реализовано в ЗАО НПО "Авиаисток" для защиты авиадвигателя в условиях повышенной запыленности и прерывистых циклов работы авиадвигателя. Следует отметить, что применение одноступенчатой схемы очистки с помощью простейших сетчатых фильтров не позволяет обеспечить высокий уровень очистки циклового воздуха, но в условиях периодической работы авиадвигателя как на ж/д платформе, так и в условиях ЗАО НПО Авиаисток это решение позволяет снижать высокую пиковую запыленность циклового воздуха и проводить регенерацию сетчатых фильтров во время остановки авиадвигателя.

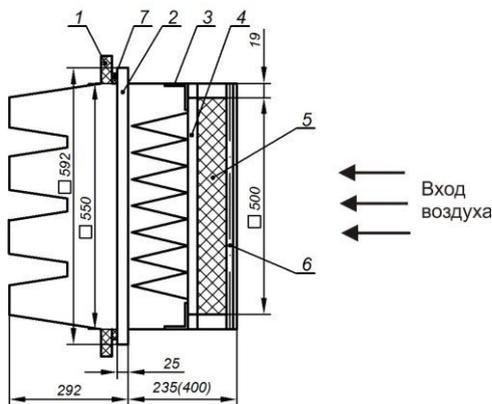
Во второй половине 90-х годов, в связи с более тесной интеграцией России в мировое сообщество, в нашу страну стали поступать газотурбинные установки, оснащенные системами фильтрации ВОУ различных зарубежных фирм AAF, Camfil, EMW, Donaldson. Вместе с этим стали предъявляться и более высокие требования (в сравнении с ГОСТ 29328-92) к чистоте циклового воздуха, что потребовало от отечественных разработчиков ВОУ применение новых подходов к схемам фильтрации циклового воздуха.

В последующие годы для очистки воздуха ВОУ получила распространение 3-х ступенчатая система очистки воздуха, которая стала широко применяться отечественными разработчиками и изготовителями ВОУ.

По техническому заданию ООО "Самара-Авиагаз" взамен систем фильтрации ВОУ фирмы EMW (Германия) нашим предприятием была разработана 3-х ступенчатая схема с использованием фильтров, производимых ООО "НПП "Фолтер".

Принципиальная схема этой системы фильтрации представлена на рис.11.

Эта схема включает 3 ступени очистки: 1-ая - предфильтр-влажнотделитель; 2-ая - карманный фильтр ФяК класса G4 и 3-я - компактный фильтр ФяС-К



**Рис.11** Схема и габаритно-присоединительные размеры системы фильтрации в ВОУ

1-опорная стена фильтрующей камеры ВОУ;

2 - фильтр ФяС-К;

3 - корпус блока предфильтра;

4 - карманный фильтр ФяК;

5 - предфильтр-влажнотделитель;

6 - фиксирующие прутки;

7 - уплотнительная прокладка

1-ая ступень предназначена для улавливания дождевых капель или снега, которые

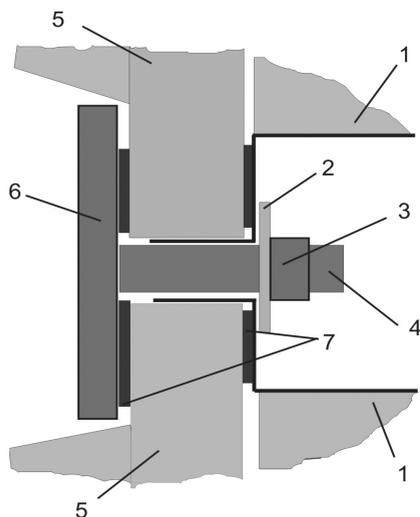
могут засасываться в ВОУ из атмосферы. Эта ступень может также улавливать твердые пылевые частицы размером более 10 мкм.

2-ая ступень предназначена для защиты фильтров тонкой очистки типа ФяС-К и способна эффективно улавливать частицы более 5 мкм.

3-я ступень обеспечивает окончательную очистку циклового воздуха до требуемого уровня чистоты.

1-ая и 2-ая ступень очистки размещается в корпусе блока предфильтров, который имеет габаритные размеры на входе 596х596 мм, для того чтобы корпус блока предфильтров мог "одеваться" на установочную раму фильтра ФяС-К, размеры которой 592х592 мм.

Установка фильтра ФяС-К и корпуса блока предфильтров осуществляется в следующей последовательности. Сначала в проем фильтрующей камеры ВОУ устанавливается фильтр ФяС-К (рис.12). Затем на установочную раму фильтра ФяС-К надвигается корпус блока предфильтров 1. После этого корпус предфильтров 1 и фильтр ФяС-К поджимаются шайбой 2 и гайкой 3 к проему фильтрующей камеры ВОУ. Уплотнение фильтров ФяС-К к фильтрующей камере ВОУ и фильтра ФяС-К с корпусом блока предфильтров осуществляется за счет резиновых уплотнений 7, расположенных на корпусе фильтров ФяК и блока предфильтров (рис.12).



**Рис.12** Схема установки и крепления блока предфильтров и фильтров тонкой очистки ФяС-К в фильтрующей камере ВОУ.

- 1-корпус блока предфильтров;
- 2-прижимная шайба;
- 3-гайка;
- 4-шпилька;
- 5-корпус фильтра ФяС-К;
- 6-опорная стена фильтрующей камеры ВОУ;
- 7-уплотнительные прокладки

После этого в корпус блока предфильтров устанавливаются фильтры ФяК 4 (рис.11) и фильтр-влагоотделитель 5, который фиксируется в блоке предфильтров с помощью специальных прутков 6.

Такая схема расположения фильтров позволяет проводить замену загрязнившихся фильтров 1-ой и 2-ой ступени в процессе эксплуатации при необходимости.

Корпус блока предфильтров изготавливается из металла с порошковым покрытием, что обеспечивает долговечность работы этого блока. На ряде объектов опыт эксплуатации зарубежных фильтров, показал, что через 1-2 года корпуса блока предфильтров, изготовленные из тонкого пластика, трескается за счет колебания температур и при замене фильтров 1-ой и 2-ой ступени.

Общий вид блока предфильтров показан на рис.13.



**Рис.13** Общий вид блока предфильтров

Фильтр ФяС-К может поставляться в металлическом (алюминий) или пластиковом корпусе.

Разработанные фильтры типа ФяС-К и карманные фильтры ФяК были подвергнуты испытаниям в соответствии с ГОСТ Р ЕН 779-2007 "Фильтры очистки воздуха общего назначения. Определение эффективности фильтрации" (Евростандарт ЕН-779-2002). Для сравнительного анализа ООО "Самара-Авиагаз" представило образцы ранее применявшихся фильтров (компактный МКР-48 и карманный S45 R-71180SG) фирмы EMW (Германия).

Стендовые испытания фильтров ФяС-К 822 и ФяК 4270 показали, что они по техническим характеристикам не уступают зарубежным аналогам.

После этого нашим предприятием с начала 2007 года осуществлялась поставка фильтров ФяС-К 822 для ВОУ, изготовленными ООО "Самара-Авиагаз". За прошедшие два года на эксплуатацию было установлено около 6 тыс. фильтров ФяС-К 822.

Фильтры были установлены на КС "Октябрьская", КС "Пыть-Ях", КС "Мокроус", КС "Александров Гай", КС "Ново-Комсомольская", КС "Гремячинская", а также на КС в Узбекистане и Казахстане. Всего фильтры ФяС-К822 были установлены на ВОУ 47-ми газотурбинных агрегатов.

Эксплуатация фильтров в составе ВОУ на этих агрегатах доказала их высокую эффективность и надежность.

Нашим предприятием по техническому заданию ЗАО "Газмашпроекта" в 2008 году был разработан фильтр ФяГ 597х597х50с класса G4 специального исполнения для замены зарубежного сетчатого фильтра типа GAL для очистки циклового воздуха в агрегатах ГТК-25 ИМ.

В настоящее время фильтры ФяГ эксплуатируются на указанном агрегате и их использование позволило повысить эффективность очистки циклового воздуха в сравнении с сетчатыми фильтрами, применявшимися ранее, которые по своей эффективности соответствовали фильтрам грубой очистки класса G2.

Данное решение, по нашему мнению, не является оптимальным, т.к. не позволяет повысить эффективность очистки до класса F7 или F8, но в рамках действующего ВОУ без каких-либо конструктивных переработок ВОУ позволило повысить чистоту циклового воздуха.

В 2008 году по техническому заданию Тюменьтрансгаз были разработаны и поставлены для эксплуатации картриджные фильтры типа ФЭП-420х290х1000П накопительного типа для газотурбинных агрегатов. Фильтры ФЭП (рис.6) представляют собой цилиндрический фильтр миниплированного фильтровального материала, обеспечивающего тонкую очистку циклового воздуха. В указанном фильтре в качестве 1-ой ступени был использован фильтрующий материал класса G4 в виде цилиндра одетого на ФЭП и обеспечивающим предварительную (грубую очистку) циклового воздуха.

В настоящее время фильтры ФЭП находятся в эксплуатации на газотурбинных агрегатах.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Суммируя изложенное, можно отметить следующее:

1. Развитие современных технологий предъявляет все более высокие требования к чистоте циклового воздуха в газовых турбинах и воздуха для компрессорных установок.

2. Для очистки воздуха в газотурбинных и компрессорных установках могут использоваться различные схемы фильтрации, выбор которых должен определяться с учетом исходных данных о чистоте окружающего воздуха и требований чистоты очищенного воздуха. Недоучет какого-либо фактора может приводить к принятию неоправданных решений и повышенных финансовых затрат.

3. ООО "НПП "Фолтер" выпускает широкую номенклатуру воздушных фильтров, способную решать практически любые задачи очистки воздуха в газотурбинных и компрессорных установках.

4. Испытания фильтров ООО "НПП "Фолтер" в соответствии с требованиями Российских и Европейских стандартов подтвердили их сопоставимость с зарубежными аналогами, а опыт эксплуатации различных фильтров в составе ВОУ газовых турбин и компрессорных установок подтвердил их высокую эффективность и надежность.