

Жохов В.Л., Аккайа Б.



Воздушные фильтры для энергетических ГТУ

Издательский дом
«Газотурбинные технологии»
2023

Выберите себе работу по душе, и Вам не придется
работать ни одного дня в своей жизни
Конфуций

Уважаемый читатель!

Если Вы держите в руках эту книгу, значит Вы являетесь звеном одной жизненно важной цепи: производитель - потребитель воздушных фильтров. Эта книга также является плодом содружества производителя воздушных фильтров и потребителя этой продукции на энергетическом рынке нашей страны. Именно в таком взаимодействии, с нашей точки зрения, и должны решаться вопросы помощи клиентам при выборе эффективных систем фильтрации атмосферного воздуха для их оборудования.

Говорить о проблеме загрязнения окружающей среды важно и нужно, но еще важнее делать практические шаги по решению данной проблемы. Воздушные фильтры являются тем техническим средством, которое позволяет минимизировать негативное влияние различного вида загрязнений на человеческий организм.

Не меньший урон загрязнение атмосферного воздуха оказывает и на энергетический сектор страны, хотя сама энергетика так же наносит ущерб окружающей среде. Данные по энергетическим факторам, оказывающим негативное влияние на окружающую среду, представленные в разных источниках информации, зачастую сильно разнятся.

Особенно чувствительны к качеству атмосферного воздуха газотурбинные установки (ГТУ), которыми оснащены современные парогазовые установки (ПГУ) электростанций. И здесь для обеспечения надежной и эффективной работы ГТУ пришли на помощь воздушные фильтры, устанавливаемые в комплексных воздухоочистительных устройствах (КВОУ) воздухозаборных тактов (ВЗТ) энергетических ГТУ.

Искренне надеемся, что представленные в нашей книге результаты многолетних исследований и опыта эксплуатации воздушных фильтров на ГТУ отечественных и зарубежных теплоцентралях (ТЭЦ) и теплосетях (ТЭС) будут полезны инженерному персоналу энергетических компаний, а также профессорско-преподавательскому составу и студентам высшим учебным заведениям энергетических специальностей.

Выражаем глубокую признательность Фрэнку Маскрофту за его ценные советы в процессе работы над подготовкой рукописи книги.

Вместо Введения

Люди не знают, чего хотят, до тех пор,
пока им это не предложат.

Фредерик Бегбедер

В помощь клиентам решить, что им нужно и чего они хотят

(письмо Ф. Маскрофта Жохову В.Л.)

Чего хочет или в чём нуждается клиент?

Если спросить клиента или производителя (фирму-изготовителя) оборудования, чего они хотят, ответ, возможно, будет «что-нибудь типа M5/F7-8» (как в твоём случае). Но действительно ли это то, чего они хотят? В 99,99% случаев клиент не имеет представления, а M5/F7-8 – лишь традиционный (условный!) ответ на твой вопрос, потому что «это используют все остальные» или другая подобная отговорка. Правда, однако, заключается в том, что они не удосужились и минуты подумать, и данный ответ – это первое, что пришло им в голову. Очевидно, что наша задача – заставить их подумать, что им действительно нужно.

Попробуй это!

Если клиент/фирма-изготовитель отвечает на вопрос стандартно (M5/F7-8), просто поинтересуйся: «Что достигается такой комбинацией фильтров, именно в вашем случае?» Как правило, 99% людей будут молча сидеть, лихорадочно соображая, что ответить. Если так и произошло, ты будешь знать, что они не продумали этот момент, и для тебя открыт путь, чтобы обсудить их нужды и требования. Однако, до того момента как ты заставишь их спросить самих себя, почему они хотят именно то, что сейчас тебе назвали, путь закрыт, поскольку непререкаемая идея об M5/F7-8 прочно закрепилась у них в головах. Обрати внимание, беседовать нужно дружелюбно и корректно и ни в коем случае не входить с ними в спор.

Помочь людям поразмышлять о том, что им нужно/ чего они хотят, могут и другие вопросы. Один из них:

Какова ключевая задача фильтров, которую вы хотите, чтобы они выполняли?

И опять 99% скажут что-нибудь типа: «Чтобы обеспечивали фильтрацию по наименьшей стоимости», или, возможно, они ответят более определённо: «Чтобы обеспечивали адекватную фильтрацию при наименьших затратах».

Мы оба знаем, что ни один из этих ответов не имеет смысла, поскольку они слишком общие или слишком неопределённые. Например, «наименьшая стоимость фильтрации» - это вполне логично что-то типа пластиковой сетки с отверстиями в 50 мм. Она будет служить вечно (практически), не будет требовать замены и будет фильтровать что угодно размером менее 50 мм по площади, и любые более мелкие частицы, которые ударяются о материал сетки. Такая сетка полностью соответствует поставленной задаче! Но в то же время, она абсолютно неадекватна.

Даже если они включили в свой ответ слова «адекватная фильтрация», что такое «адекватная»? Да всё, что душе угодно, но совершенно не реально.

Цель здесь состоит в том, чтобы заставить клиента/фирму-производителя прийти к пониманию, что необходимо взять чистый лист бумаги и определить задачу для фильтров. Как только удалось подвинуть клиента к этому шагу, можно считать, что существенная часть работы по определению задачи находится под твоим контролем, поскольку для них это новое пространство для освоения, а мы прошли этим путём уже много раз. В этом отношении разговор с фирмой-производителем может быть трудным, но существуют вопросы, на которые и они не могут ответить, и я о них скоро упомяну.

Задачи для большинства установок отличаются от ранее названных, поскольку к установкам применяют различные комбинации требований. Итак, здесь я обрисую компоненты, которые влияют на формулировку задачи.

1. Необходимо ли увеличивать до максимума выработку энергии в любое время?

Это требование не является универсальным для всех случаев, поскольку компания, занимающаяся выработкой электроэнергии, возможно, и не в состоянии продать всю электроэнергию, которую способна выработать. В таком случае способность генерировать большие энергии сверх определённого уровня не имеет ценности, а, следовательно, не важна. Если такая компания способна продать всю вырабатываемую ею электроэнергию, тогда потеря электроэнергии из-за снижения эффективности системы является неприемлемой, как и загрязнение компрессора. Перепад давления КВОУ также становится важным и в данном случае должен быть минимизирован.

Вот где фирмы-изготовители терпят неудачу в своих доводах, и аргумент «M5/F7-8» можно рассматривать как безнадёжный. Причиной тому является то, что их техническое условие касательно M5/F7-8 неадекватно, если только они не готовы гарантировать то, что M5/F7-8 предотвратит любое снижение выработки, вызванное загрязнением компрессора на протяжении всего периода эксплуатации между остановками на текущий ремонт (уход

за оборудованием). Конечно, они не будут этого гарантировать, следовательно, их техническое решение неадекватно, т.к. не предотвращает снижение выработки, которое может быть устранено путём промывки. Промывка двигателя занимает время и имеет нежелательные последствия (воздействия), о которых говорится в моих записках.

2. Важна ли стоимость топлива или его потребления для работы газовой турбины?

Некоторые потребители не платят за топливо (оно отпускается им бесплатно покупателем электроэнергии, но могут быть и другие причины, например, трубопроводные компрессоры, берущие топливо из трубопровода, и т.д.), и, если затраты на топливо не важны для функционирования, тогда снижение эффективности работы двигателя из-за загрязнения компрессора неприемлемо и снова всё сводится к промывке компрессора. Если им нужно промывать компрессор в течение года между периодами технического обслуживания, или имеет место какое-либо снижение эффективности из-за загрязнения компрессора, тогда требование «M5/F7-8» является неадекватным. Если они говорят, что это невозможно, тогда ты можешь упомянуть Saltend, где им не требуется очищать двигатель даже после непрерывной инспекции на протяжении 48.000 часов.

Опять же, для фирмы-изготовителя, если только она не готова гарантировать отсутствие снижения эффективности из-за загрязнения компрессора, требование «M5/F7-8» является неадекватным. Если фирма-изготовитель утверждает, что промывка компрессора является обычным делом, тогда ты можешь спросить, будет ли срок службы двигателя больше, а затраты на техническое обслуживание меньше, если не будет необходимости промывки компрессора. Существует только один логический ответ, а именно, что двигателю будет лучше без загрязнения. На самом деле, вероятно, отдел по оборудованию фирмы-изготовителя имеет слабое представление о том, что они делают, когда дело доходит до фильтров, что приносит пользу и выгоду клиенту. Что касается фирмы-изготовителя, то, пока фильтры достаточно хороши, чтобы служить дольше гарантийного срока, не требуя затрат со стороны фирмы-изготовителя, то эти фильтры, возможно, то, что нужно (но, конечно, ты не можешь им этого оказать).

3. Применимы ли к данному способу затраты на углеродный налог?

Третий спорный вопрос в большинстве европейских стран это углеродный налог. И, хотя это пока может и не касаться России, но, я думаю, в конце концов будет касаться. При цене

за тонну CO₂ в 20 фунтов стерлингов для GE 9F, фильтры H10 сэкономят дополнительно 500.000 фунтов стерлингов в год в угольных эмиссиях, по сравнению с F8-фильтрами, и это благодаря только прибыли от средней эффективности, поскольку возросшая эффективность компрессора уменьшает потребление топлива на каждый мегаватт вырабатываемой электроэнергии. Опять-таки аргументы для фирмы-изготовителя те же, что и раньше, а именно если их выбор фильтров M5/F7-8 подходящий, тогда они должны быть в состоянии гарантировать уменьшение цифр (показателей) выброса угля (эмиссии). Могу тебя заверить, они не найдут что сказать.

4. Являются ли перерывы (простои) на промывку компрессора приемлемыми для работы газовой турбины?

Это законный и логичный вопрос, т.к. многое зависит от того, как функционирует установка. Например, на установке, работающей в непрерывном режиме, остановки для промывки компрессора неприемлемы, поскольку станция теряет прибыль, когда установка отключена от сети в течение 2 дней (для большой установки) и полезность (работоспособность) установки уменьшается, а, следовательно, снижается выработка электроэнергии. Если установка работает в пиковом режиме (я знаю некоторые электростанции, которые работают только по 150 часов в год), тогда у обслуживающего персонала есть в распоряжении сколько угодно времени на промывку компрессора, но даже хотя у них и есть это время, отключение установки, пока осуществляется промывка, уменьшает полезность электростанции, а полезность является важнейшим аспектом при оценке работы персонала станции и эффективности её управления.

У нас нет сильного аргумента для использования фильтров высокой эффективности на установках, работающих в пиковом и резервном (аварийном) режимах, поскольку единственная выгода, которую мы можем им предложить – это увеличение полезности (работоспособности) благодаря исключению требования промывки компрессора.

В качестве заключения я упомяну, что рассматривал здесь лишь уровень тонкой фильтрации т.к. уровень пред-фильтрации является местной проблемой для местных условий окружающей среды. Однако, я надеюсь, ты видишь, что практически невозможно предложить универсальное решение для всех (один универсальный размер, который бы подходил в любом случае), если только это, скажем, не H10 или H13 для установки работающих в непрерывном режиме, или, скажем F8/F9 для установок, работающих в пиковом или резервном (аварийном) режиме. Требование «F7/F8» для установок, работающих в непрерывном режиме является абсолютно неадекватным.

Вкратце, ты можешь сказать, что, если компрессору вообще необходима промывка, тогда это требование по фильтрам является неадекватным. Стоимость H10 или H13 – фильтров незначительна по сравнению с экономией на топливе, выработке электроэнергии и эмиссии угля.

Надеюсь, это пригодится для твоей полемики.

Фрэнк Маскрофт

Ева Filter

Народ, не знающий своего прошлого,
не имеет будущего
М.В. Ломоносов

Краткая историческая справка

Еще насколько десятков лет назад на всае первых наземных ГТУ не предусматривалось никаких устройств очистки атмосферного воздуха. Затем, после того, как участились случаи поломки лопаточного аппарата турбомашин, в воздухозаборных камерах энергетических ГТУ появились примитивные, с точки зрения современного читателя, устройства очистки воздуха. Типичным примером такой системы воздухоочистки циклового воздуха энергетической установки ГТУ-100, является устройство, изображенное на рис.1.

В воздухозаборной камере установлены фильтры, которые образуют фильтрующие устройства для газотурбинной установки. Фильтры рулонные марки ФРНК-1 (нетканое клееное фильтровальное полотно толщиной 25 мм) являются фильтрами общего назначения и предназначены для очистки воздуха при начальной среднегодовой запыленности не более $0,5 \text{ мг/м}^3$ и кратковременной до 1 г/м^3 .



Рис.И1. Фильтровальный материал: а-внешний вид; б- характеристики материала

Фильтр состоит из трех одинаковых секций. Каркасы смежных секций стянуты болтами. Секция фильтра представляет собой каркас, внутри которого имеется цепной транспортер с подвижными решетками (Рис.2а). На верхних и нижних частях стенок каркасов установлены разъемные подшипники для укладки в них осей катушек с фильтрующим материалом, причем съёмные стенки каркасов имеют общие подшипники для обеих катушек. На верхние катушки намотаны полотна фильтрующего материала, которые пропускаются вдоль сечения фильтра и закрепляются на нижних катушках.

Для закрепления фильтрующего материала на катушке имеется скоба, которая прокалывает полотно на первом витке. В сечениях секций фильтров полотна фильтрующего материала опираются на подвижные решетки. Перемотка фильтров по мере их загрязнения осуществляется на остановленной ГТУ (Рис.2б).



а

б

Рис.И2. Секции фильтра: а-каркас с цепным транспортером; б- катушки с фильтровальным материалом

Аналогичные системы очистки воздуха применялись в воздухоочистительных устройствах (ВОУ) ГТУ газоперекачивающих станций. Очистка скопившейся на фильтровальном материале пыли и песка осуществлялось в ванной, наполненной техническим маслом. В результате чего, масло с фильтровального материала попадало на лопатки компрессора ГТУ.

Другой способ очистки воздуха для ГТУ-150 изображен на рис.3.



а

б

Рис.И3. Система фильтрации: а- внешний вид; б- способ крепления фильтровального материала

Фильтр комплектуется объемным фильтрующим материалом типа ФРНК-ПГ, который для увеличения площади фильтрации укладывается зигзагообразно.

1. Система воздухоочистки ГТУ одноступенчатая. Класс очистки атмосферного воздуха данным фильтровальным материалом – G2, что не обеспечивает необходимого уровня очистки воздуха от мелкодисперсной пыли.
2. Крепление фильтровального материала осуществляется с помощью металлической ржавой проволоки, которая сама является источником загрязнения.

Очевидно, что рассмотренные фильтры не обеспечивали необходимый уровень очистки циклового воздуха ГТУ. Они могли только предотвратить попадание на всас ГТУ крупнодисперсных частиц пыли, песка, листьев и посторонних предметов в виде мусора. Надо отметить, что система промывки проточной части у этих ГТУ отсутствовала.

Вот так первоначально выглядели системы очистки циклового воздуха отечественных энергетических ГТУ. А теперь обратимся к реалиям современных фильтрационных технологий.

Кто не осилит малого,
тому и великое не под силу
М.В. Ломоносов

Глава 1. Основные понятия и принципы фильтрации воздуха

1.1. Основные понятия

«Атмосферный воздух является жизненно важным компонентом окружающей среды, неотъемлемой частью среды обитания человека, растений и животных» - такое определение дает Федеральный закон от 04.05.1999 N 96-ФЗ "Об охране атмосферного воздуха".

Основными понятиями этого закона являются: атмосферный воздух - жизненно важный компонент окружающей среды, представляющий собой естественную смесь газов атмосферы, находящуюся за пределами жилых, производственных и иных помещений;

Загрязняющее вещество - химическое вещество или смесь веществ, в том числе радиоактивных, и микроорганизмов, которые поступают в атмосферный воздух, содержатся и (или) образуются в нем и которые в количестве и (или) концентрациях, превышающих установленные нормативы, оказывают негативное воздействие на окружающую среду, жизнь, здоровье человека;

Загрязнение атмосферного воздуха - поступление в атмосферный воздух или образование в нем загрязняющих веществ в концентрациях, превышающих установленные государством гигиенические и экологические нормативы качества атмосферного воздуха;

Важность атмосферного воздуха для жизнедеятельности человека можно проиллюстрировать следующим примером. Известно, что человек за один день в среднем съедает 1 кг пищи, выпивает 2-2.5 литра воды и вдыхает 15 кг воздуха. Соотношение в приоритетах суточных потребностей человека наглядно показывает Рисунок 1.1.



Рис. 1.1. Соотношение потребления человеком пищи, воды и воздуха

Без воды и пищи человек может прожить несколько дней, без воздуха – несколько минут. Данную аналогию можно применить и к любому оборудованию, рабочим телом которого является атмосферный воздух. Без кислорода невозможен процесс горения, а, следовательно, и совершение работы большинством машин и механизмов. От качества атмосферного воздуха зависит как здоровье человека, так и эффективность работы энергетического оборудования, особенно газотурбинных установок (ГТУ).

Однако, надо различать, какой воздух вдыхает человек и какой ГТУ. Согласно отчета № 23 ЕСА «Качество воздуха в помещении и рациональное использование энергии» 90% времени люди проводят в помещении. Это означает, что от загрязненности воздуха помещений существенно зависит здоровье человека. Взвешенные в воздухе частицы попадают в здания через систему вентиляции и открытые окна и двери. Согласно данным профессора Свена Эрика Даляна (Каролинский Институт экологической медицины), неэффективная работа системы вентиляции и наличие внутренних источников загрязнения может означать, что во многих случаях воздух в помещении может быть в среднем в 5 (50)* раз грязнее и в 10 раз токсичнее уличного [1]. В регионах с загрязненной окружающей средой более 25 миллионов частиц попадают в организм человека с каждым вдохом.

Еще 150 лет назад немецкий химик Макс фон Петтенкофер указывал “плохой воздух” как негативный фактор долгого пребывания в жилых кварталах и образовательных учреждениях, и идентифицировал CO_2 как важнейший компонент оценки качества воздуха (Рис.1.2). Он установил 0,1 % об. (= 1000 ppm) как стандарт концентрации CO_2 в помещении – так называемое число Петтенкофера, которое долгое время оставалось действующей нормой [2]. Симптомы плохого самочувствия, такие как головная боль, усталость и потеря внимания, проявляются при её повышении.

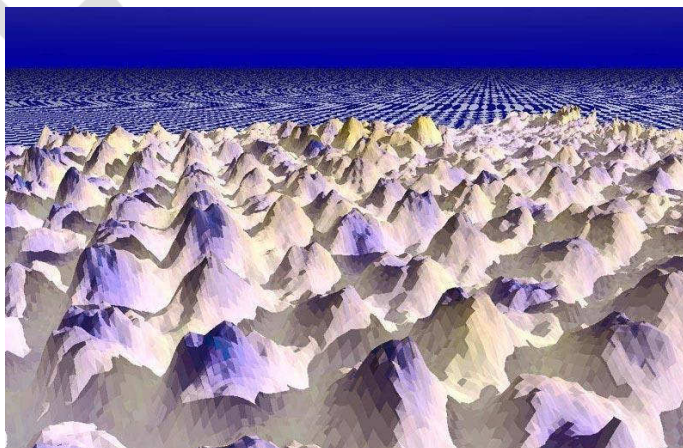


Рис.1.2. Фото атомов углерода под электронным микроскопом (<https://clck.ru/33Rksn>)

В качестве примера воздействия CO₂ на состояние человека в помещении приведем результаты исследований, выполненных в школах Германии [2]. Всего за один учебный час в классе этот показатель только за счёт воздуха, выдыхаемого учениками и учителями, повышался до 1500 ppm и более, а после 90 минут занятий фиксировались значения порядка 2700 ppm. В конце занятия это вызывает повышенную усталость и ослабление внимания – симптомы, которые прямо мешают обучению и преподаванию. Исследование, проведённое в США, позволило сделать вывод, что концентрация CO₂ в учебных классах прямо влияет на посещаемость учеников. Повышение концентрации CO₂ до 1000 ppm ведёт к снижению посещаемости на 10-20 %. Согласно другому исследованию, каждые лишние 100 ppm CO₂ снижают годовую посещаемость учеников на 0,2 %. Также было установлено, что повышение кратности вентиляции может снизить отсутствие по болезни на 10 -17 %. Таким образом, CO₂ влиял на посещаемость занятий в исследованных школах.

Надо отчетливо понимать, что несмотря на идентичность по многим параметрам, внутренний (в помещении) и наружный (вне помещения) воздух имеют несколько отличий: 1) внутренний воздух содержит намного больше тонких волокнистых веществ, чем внешний. Это волокнистые частицы от одежды, ковров, мебели, бумаги и другой современной внутренней отделки помещений.

2) внутренний воздух обычно более сухой, чем внешний, другими словами, его относительная влажность обычно ниже;

3) в наружном воздухе присутствует большая концентрация несгоревшего углеводорода. Во внутреннем воздухе эта концентрация намного меньше из-за объединения тонких частиц в грубые вследствие постоянной (бесперебойной) циркуляции воздуха системой вентиляции.

Первое, очевидное отличие – это состав волокон. Наружный воздух содержит тонкие волокнистые частицы, такие как пыльца и семена различных растений. Концентрация этих частиц в воздухе может быть различной в зависимости от времени года и региона расположения объекта. Внутренний воздух содержит огромное количество волокнистых частиц одежды, ковров, мебели, бумаги, человеческих волос и т.д. Как было показано ранее, во внутреннем воздухе концентрация пыли намного выше, чем во внешнем воздухе. В среднем она имеет показатель 5% (по весу) из-за того, что во внутреннем воздухе происходит слабая циркуляция свежего воздуха [3].

Пыль, содержащаяся в атмосферном воздухе

За последние годы в разных странах мира проведены многочисленные теоретические и

экспериментальных исследования в отношении загрязняющих веществ, содержащихся в атмосферном воздухе, с целью определения их химического состава, распределения их по размеру и концентрации в различных регионах. В результате этих исследований было установлено, что атмосферная пыль делится по размеру на три большие группы [4].

Первая из этих групп называется стадией образования ядра и представлена частицами размером от 0.001 до 0.3 мкм с пиковой концентрацией 0.013 мкм. Вторая группа охватывает диапазон частиц размеров от 0.03 до 4 мкм с пиковой концентрацией 0.069 мкм и называется стадией аккумуляции. Третья группа – стадия грубых частиц, которая имеет диапазон размеров от 0.4 до 100 мкм с пиковой концентрацией 2.15 мкм. Объединенный график теоретического распределения частиц по количеству в каждой из трех групп представлен на Рисунке 1.3.

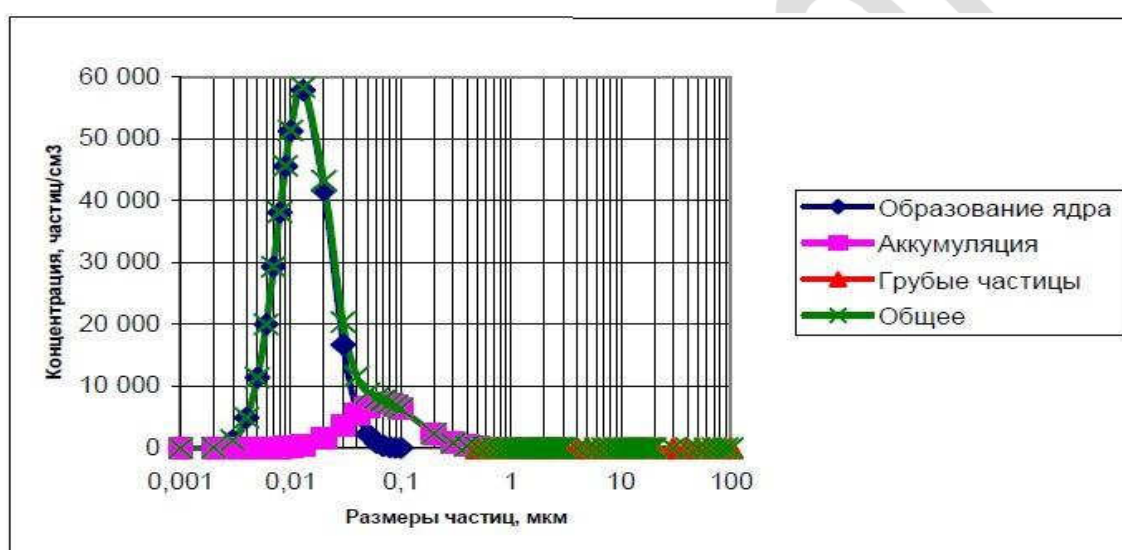


Рис. 1.3. Теоретическое распределение пыли по количеству в атмосферном воздухе [4]

Следует отметить, что количество крупнодисперсных частиц незначительно по сравнению с частица меньшего размера. Между тем, эта ситуация существенно меняется в зависимости от того, как осуществляется или замеряется распределение частиц по: количеству, площади поверхности или массе (объему). Выполненные исследования показали, что частицы небольшого размера несут существенны, когда во внимание принимается объем (вес). В тоже время они являются доминантными, когда критерием оценки является концентрация частиц по количеству. Применительно к загрязнению проточной части компрессора ГТУ наиболее важным фактором является площадь, которую покрывают частицы пыли. Например, частица углерода размером в 10 мкм покрывает ту же площадь, что и частица свинца того же размера, хотя последняя весит в 16 раз больше.

Процесс образования частиц пыли в воздухе важен для понимания и оценки их влияния на загрязнение проточной части ГТУ. Каждая из групп частиц делится на

дополнительные категории: основные и второстепенные. Основные частицы по падают в атмосферу уже сформировавшимися. Второстепенные частицы образуются в атмосферном воздухе путем конденсации газов посредством процессов конверсии частиц или коагуляции из частиц меньшего размера.

В процессе образования пыли в атмосферном воздухе различают частицы, которые являются ядром загрязняющих веществ. Так называемые ядровые частицы очень малы по размеру и имеют относительно короткий жизненный цикл, поскольку они быстро коагулируются и образуют более крупные частицы. Новые, аккумулятивные частицы более устойчивы и существуют длительное время. Ядровые частицы являются продуктами сгорания, в составе которых присутствует элементарный углерод. Некоторые ядровые частицы образуются из паров металла, выделяемых в процессе плавки.

Рост аккумулятивных частиц может быть медленным процессом, в результате чего такие частицы остаются в атмосферном воздухе длительное время, что способствует их естественному перемещению вместе с воздушными потоками.

Грубые частицы могут формироваться долгой и медленной коагуляцией более мелких ядерных и аккумулятивных частиц. На концентрацию этих частиц в атмосферном воздухе и распределение пыли по размерам существенное влияние оказывает скорость ветра и характеристики конкретного региона. Грубые, крупные частицы быстро оседают на землю, что объясняет факт отсутствия в атмосферном воздухе частиц размером более 15 мкм.

На Рисунке 1.4 представлено сравнение теоретического распределения частиц атмосферной пыли по площади и результаты исследования пыли профессором К.Т. Уитби (К.Т. Whitby) [5].

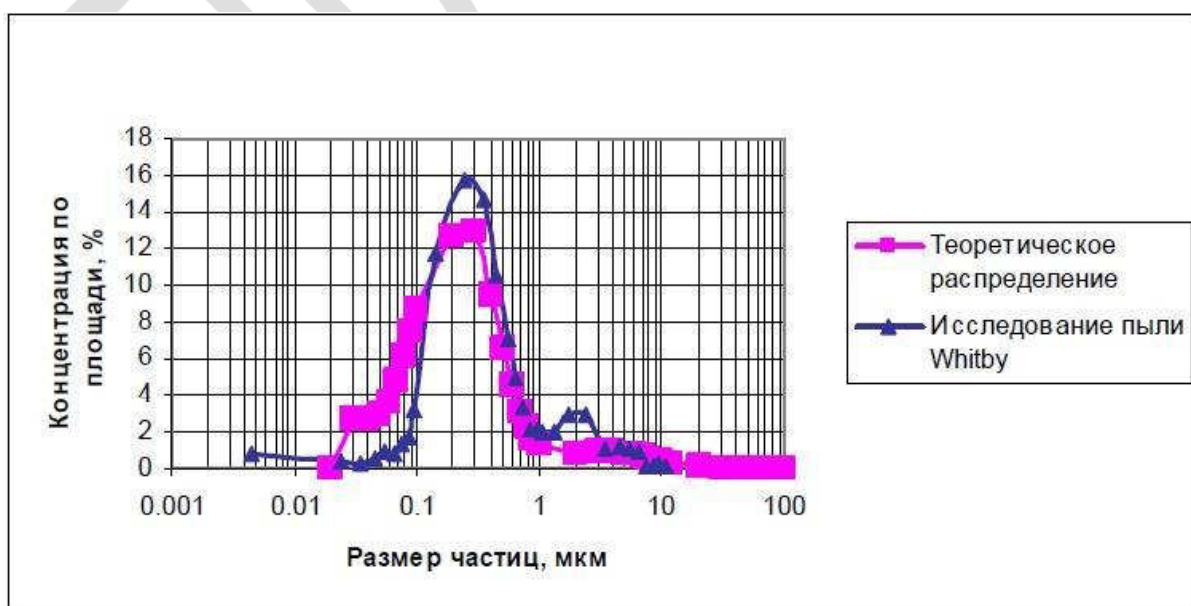


Рис.1.4. Сравнение воздушной пыли по площади

Хотя исследования профессора Уитби проводились в середине прошлого века, его выводы остаются актуальными и сейчас, но с небольшим уточнением. Дополнительное загрязнение атмосферного воздуха в настоящее время ведет к более высокому уровню образования ядерных и аккумулятивных частиц. И теоретическое распределение частиц по площади, и результаты исследований профессора Уитби показывают, что пиковое значение размера частиц соответствует примерно 0.25 мкм. Поэтому частицы в диапазоне этого размера представляют наибольший интерес для изучения загрязнения компрессора ГТУ. На Рисунке 1.5. представлено процентное распределение частиц пыли различной дисперсности в реальном атмосферном воздухе (по данным профессора Уитби 1958 года) [5].

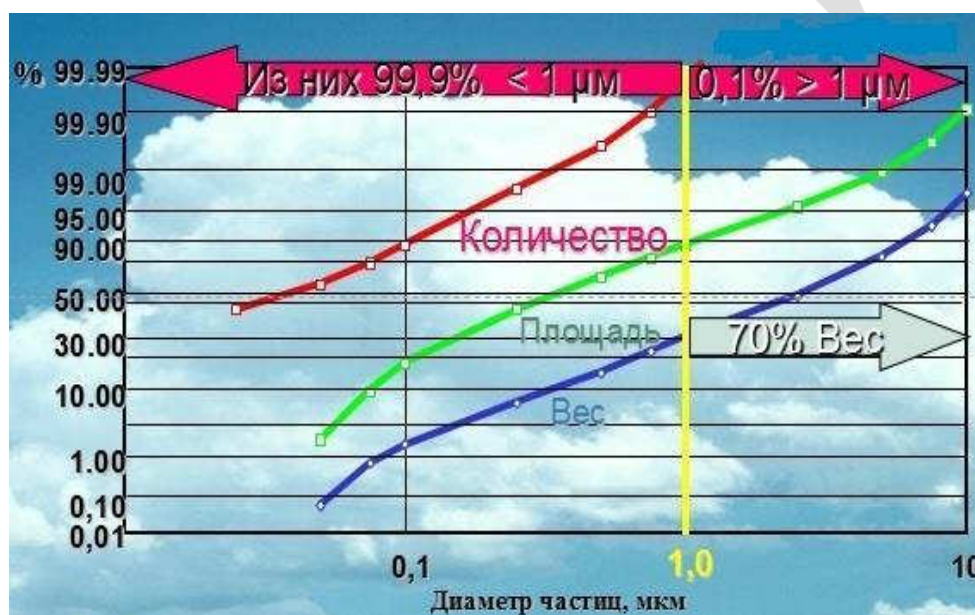


Рис.1.5. Процентное содержание частиц пыли в атмосферном воздухе

Распределение размеров частиц атмосферной пыли во всем мире показывает завидное постоянство в диапазоне значений менее 1 мкм, которое составляет 99,9% от общего количества частиц. Количество частиц размером >1 мкм в реальном воздухе не более 0,1%, однако их вес достигает 70% от общего значения.

Различия атмосферной пыли в разных регионах обычно зависят от погодных условий и заключаются в диапазоне частиц крупного размера и общем количестве (концентрации) пыли в воздухе.

Концентрация пыли, измеряемая в мг/м³, варьируется в разных регионах в широком диапазоне, что обусловлено местными климатическими условиями.

В Таблице.1.1. показан диапазон концентрации типичной пыли в различных местностях [3].

Таблица 1.1. Концентрация типичной атмосферной пыли в различных местах

Местность	Диапазон температур, °С	Концентрация пыли, мг/м ³	Диапазон размеров частиц, мкм
Побережье и море	-20 до +30	0.01 до 0.3	0.003 до 5.000
Города и электростанции	-20 до +45	0.03 до 0.3	0.003 до 10
Тяжелая промышленность	-20 до +45	0.1 до 10.0	0.003 до 2000
Сельская местность	-20 до +40	0.01 до 0.1	0.003 до 3.0
Пустыни и песчаные бури	-5 до +45	0.01 до 700	0.003 до 2000
Тропики	+5 до +40	0.01 до 0.3	0.003 до 10
Арктика	-50 до +5	0.01 до 0.3	0.003 до 10

Границы размеров крупных частиц в прибрежных и морских регионах определяются морскими брызгами. Более высокий уровень в районах тяжелой промышленности определяется крупными частицами от обработки стали и минералов. Верхняя граница в пустыне представлена частицами крупного песка во время пыльных бурь, которые случаются несколько дней в году.

В нашей стране, по данным информационного агентства РБК со ссылкой на выводы международной аудиторско-консалтинговой компании Finexpertiza, основными источниками загрязнения - являются предприятия металлургической, горнодобывающей, нефтяной и целлюлозно-бумажной промышленности, а также компании в сфере жилищно-коммунального хозяйства.

В 2019 году российские предприятия и транспорт выбросили в атмосферу 22.7 млн. т загрязняющих веществ. На одного жителя России пришлось в среднем около 155 кг вредных выбросов в год — эта цифра колеблется от 23 кг до 1.6 т в зависимости от региона, утверждают эксперты. Около трех четвертей всех выбросов генерируют предприятия, одну четверть отравляющих воздух веществ производят автомобили. Из промышленных производств сильнее всех загрязняет атмосферу металлургия (3,7 млн т выбросов в год, или 21% от всех выбросов предприятий) [6].

В первом квартале 2020 года (РБК от 25.05.2020 года) по результатам анализа компании Finexpertiza, сделанным на основе данных Росгидромета, уровень загрязнения воздуха стал рекордным за последние пять лет (наблюдения ведутся с 2015 года). В этот период времени в России было зафиксировано 44 случая высокого загрязнения воздуха, что на 57% превышает количество существенных выбросов за аналогичный период 2019 года (28 случаев). Больше всего случаев загрязнения воздуха за год было в 2018 году - 90. Из них 86 были высокого уровня, 4 - экстремально высокого. Больше всего пострадали Бурятия (21 случай), Забайкалье (8) и Красноярский край (7) [7].

Влияние загрязняющих частиц на человека и ГТУ.

В загрязненных областях страны более 25 миллионов частиц попадают в организм

человека с каждым вдохом. Влияние загрязняющих частиц на здоровье человека связано с их размером. На рис.1.6 показано соотношение размера человеческого волоса с размером частиц пыли в воздухе. Согласно стандарта ISO 16890 «Воздушные фильтры для общей вентиляции» размеры «твердых частиц» обозначаются PM (общее количество взвешенных в воздухе твердых частиц размером меньше 10, 2,5 и 1 мкм, выраженное в мкг/м³).

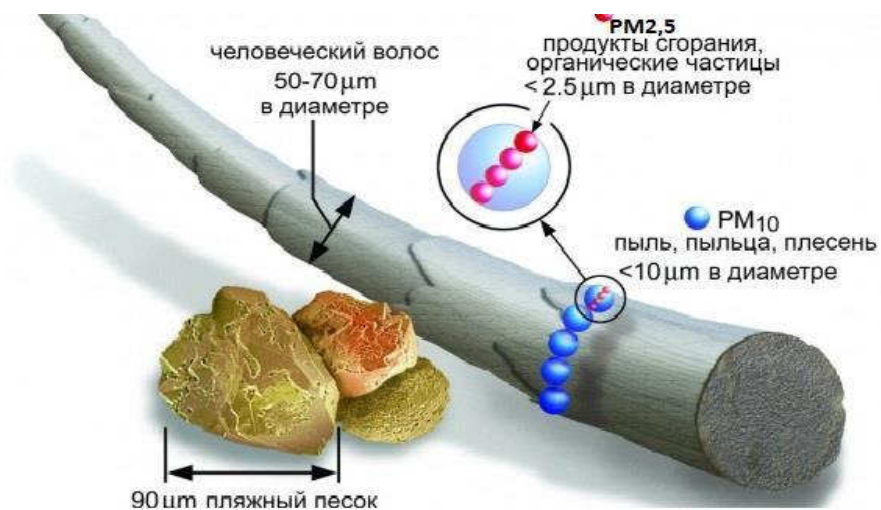


Рис.1.6. Соотношение размеров человеческого волоса и частиц (<https://clck.ru/33RT9x>)

На рис.1.7 проиллюстрировано влияние размера частиц в воздухе на здоровье человека. Установлено, что чем меньше размер, тем больший вред здоровью наносится частицами. Наиболее опасные частицы PM1.

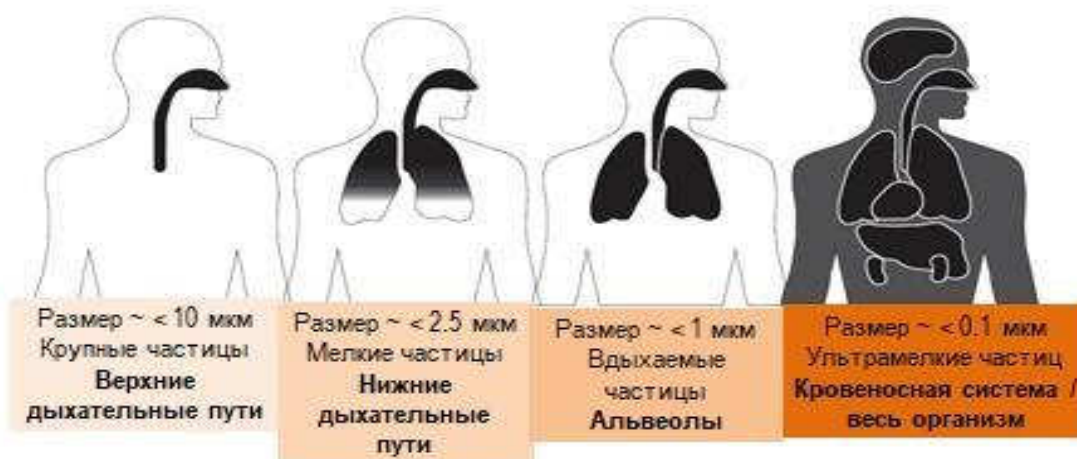


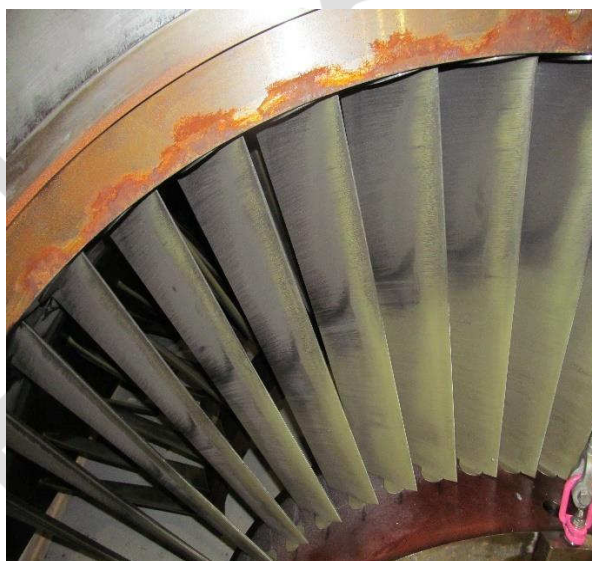
Рис.1.7. Влияние размера частиц на здоровье человека (<https://clck.ru/33RT2R>)

По оценкам Всемирной Организации Здравоохранения 800 000 преждевременных смертей в год в Европе связано с воздействием частиц [8]. Уменьшение концентрации PM_{2,5} на 10 мкг/м³ приводит к увеличению продолжительности жизни на 0,61 ± 0,2 года.

Проводя ассоциацию человеческого организма с «организмом» ГТУ, логично будет рассмотреть влияние размеров частиц пыли наружного воздуха на работу турбомашины. Грубые (большие) частицы воздушной пыли, имеющие существенную массу и твёрдость, могут стать причиной эрозии вращающихся частей машины, преждевременного изнашивания или повреждения деталей (Рис.1.8а.) [9]. Другие загрязняющие вещества могут вступить в реакцию с влагой или какими-либо химическими элементами, присутствующими в воздухе и/или в топливе, образовав соединения, которые могут вызывать коррозию деталей машины и уменьшить срок их эксплуатации (Рис.1.8б).



а



б



в



г

Рис.1.8. Лопатки ГТУ: а- эрозия кромок лопаток; б- коррозия, в- загрязнение осевых компрессоров, г- загрязнение каналов охлаждения лопаток газовой турбины.

И только очень маленькие частицы, чаще размером меньше 1 мкм, могут образовать загрязняющий слой на лопастях компрессора и в охлаждающих каналах, влияя таким образом на надежность и эффективность ГТУ, снизив её мощность (Рис.1.8в, г). Эти частицы, размером меньше микрона, являются результатом деятельности человека и представляют собой огромную проблему для процесса фильтрации в современных высокоскоростных ГТУ большой мощности. Самыми значительными загрязняющими веществами являются несгоревший углеводород и соль.

Загрязнение обычно появляется большей частью на первых ступенях компрессора, которые являются наиболее перегруженными в современных ГТУ. Даже небольшие отложения частиц на лопатках первой ступени компрессора вызывают снижение расхода воздуха и изменение оптимальных углов атаки на лопатки. Уменьшение расхода воздуха приводит к смещению рабочей точки компрессора к границе помпажа, возникают срывные течения на лопатках последующих ступеней компрессора. Таким образом, данное явление прогрессирует по всему компрессору до последней ступени. Если снижение расхода воздуха является значительным, то на одной из ступеней компрессора может возникнуть вращающийся срыв потока, а затем помпаж, что может привести к разрушению лопаток компрессора [10].



Рис.1.9. Повреждение лопаток осевого компрессора ГТУ (<https://goo.su/QHo11>)

Результатами загрязнения компрессора ГТУ являются (рис.1.8в):

1. Снижение расхода и давления воздуха на выходе компрессора.
2. Снижение выработки электроэнергии ГТУ.
3. Повышение потребления топлива ГТУ, а, следовательно, и повышение

эксплуатационных расходов.

4. Снижение устойчивости двигателя к возникновению помпажа, увеличение вероятности срыва потока и разрушения лопаток.
5. Повышение рабочей температуры деталей горячей части, а значит уменьшение их срока службы.
6. Для обеспечения диспетчерского графика системного оператора по выработке мощности, оператор энергетической ГТУ вынужден компенсировать снижение работы компрессора увеличением количества потребляемого топлива и повышением температуры отработанных газов.

Очевидно, что проблемы компрессоров и газовых турбин, представленные на рис.1.8, являются результатом неудовлетворительной работы системы воздушной фильтрации циклового воздуха ГТУ. Операторы энергетических ГТУ не должны мириться с этой ситуацией, приводящей к потере выходной мощности, дополнительным затратам на топливо и моющий раствор для очистки проточной части компрессоров. Все эти потери могут быть существенно снижены за счет выбора оптимальной с учетом климатических условий систем очистки циклового воздуха энергетических ГТУ.

Для производителей воздушных фильтров важнейшим является выполнение требований стандартов и ГОСТ для своей продукции. Поэтому они используют положительные результаты тестов своих фильтров в качестве критериев, несмотря на результаты их эксплуатации в реальных условиях. Это естественно ведет к тому, что главным критерием для производства фильтров являются стандарты, а удовлетворительная работа фильтров в реальных условиях - это второстепенный критерий.

Эта ситуация долгие годы являлась противоречием между производителями фильтров и энергетическими компаниями, использующими их продукцию, поскольку не существовало стандартов для фильтров роторных машин, включая ГТУ.

Главным выводом из выполненного анализа является то, что внутренний воздух (в помещении) по своему составу отличается от наружного воздуха и поэтому фильтры для очистки внутреннего воздуха («Фильтры общего назначения») не пригодны для очистки циклового воздуха энергетических ГТУ.

1.2. Принципы теории фильтрации

Для очистки атмосферного воздуха от различного вида загрязняющих веществ используются многообразные системы фильтрации на основе матерчатых фильтров. Матерчатые фильтры в зависимости от эффективности очистки разделяются на три основные группы: низкоэффективные, средне-эффективные и высокоэффективные. Каждая группа поделена на две подгруппы: с использованием электростатического заряда (на основе полиэстера) и без него (стекловолокно, целлюлоза и материалы на основе хлопка). Разделение на подгруппы проводится также в зависимости от способа очистки фильтруемых элементов. В первую подгруппу попадают фильтры, в которых предусмотрена самоочистка импульсом обратного движения воздуха (импульсные самоочищающиеся фильтры), вторая подгруппа - это фильтры, которые при достижении предельно - допустимого давления в системе просто заменяются.

Имеет место общее заблуждение, что в фильтровальном материале работают только волокна и ячейки между ними. Другими словами, все частицы, размер которых больше ячеек материала, удерживаются им, а частицы, размер которых меньше, проскакивают. Данная концепция не совсем верна и приводит к неправильному толкованию механизмов фильтрации с использованием пористых материалов, поскольку она верна лишь для крупных частиц и объясняет только «грубую» фильтрацию, что составляет лишь малую часть возможностей фильтровального материала.

Рассмотрим более подробно основные принципы теории фильтрации воздуха, на которых построен механизм работы фильтров, изготовленных из этих материалов.

В теории фильтрации существует несколько принципов, по которым осуществляется очистка воздуха от загрязняющих веществ. К ним относятся принципы: отсеивания (просачивания), инерции (столкновения), перехвата, диффузии и электростатического заряда (притяжения). Первые четыре принципа относятся к группе механического захвата частиц, последний - это электростатический метод

Эффективность действия того или иного механизма осаждения определяется коэффициентом захвата [11].

Для одиночного изолированного фильтрующего элемента коэффициент захвата η_z определяется как отношение площади сечения F_{Π} набегающего потока, из которого все частицы полностью осаждаются на элементе, к проекции площади фильтрующего элемента F_1 на плоскость, нормальную к направлению движения потока:

$$\eta_z = F_{\Pi}/F_1 \quad (1.1)$$

Для аналитического определения коэффициентов захвата любого из механизмов необходимо использовать данные о поле скоростей при обтекании фильтрующего элемента. Такие данные имеются только для тел простейшей формы: шара и цилиндра. В большинстве случаев коэффициенты захвата определяют по формулам, использующим как теоретические, так и экспериментальные данные.

Для наглядности принципы очистки воздуха группой механического захвата частиц можно изобразить графически, как это сделано на Рисунках 1.10 – 1.13 [12].

Эффект отсеивания (просачивания).

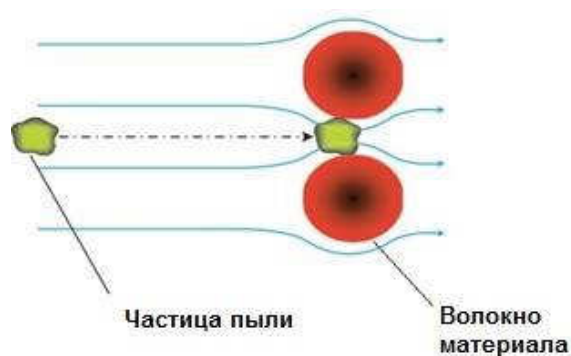


Рис. 1.10. Механизм отсеивания

Задерживаются частицы с диаметром, превышающим зазор между волокнами фильтровального материала (Рис.1.10). Данный процесс происходит на поверхности фильтра или близко к ней и является очень важным фактором для фильтров импульсного типа.

Эффект инерции (столкновения).

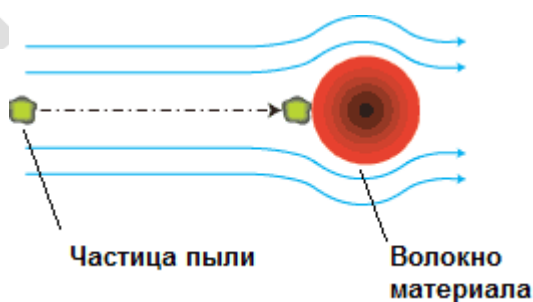


Рис. 1.11. Механизм столкновения

Крупные частицы имеют массу и импульс, достаточные для того, чтобы не отклоняться от линии тока воздуха и столкнуться с волокном фильтра при обтекании его

воздушным потоком (Рис.1.11). В результате, эти частицы сталкиваются с волокнами материала. Интенсивность нарастания частиц повышается при увеличении их размера, количества, скорости движения, плотности материала. Для определения коэффициента захвата под действием сил инерции используется критерий Стокса, характеризующий отношение инерционной силы, действующей на частицу, к силе сопротивления среды:

$$Stk = v_0 d_c \rho_c C_k / (18 \mu_0 d_b), \quad (1.2)$$

где d_c - диаметр частицы пыли; ρ_c - плотность частиц; d_b - диаметр цилиндра (волокна фильтрующего материала); v_0 - скорость газового потока; μ_0 - динамическая вязкость газа; C_k - поправка Кенингема, вводится для частиц диаметром порядка длины среднего свободного пробега молекул газа.

Таким образом, коэффициент захвата за счет инерции для одиночного цилиндра (волокна) можно выразить следующей формулой [11]:

$$\eta'_{Stk} = \frac{Stk^3}{Stk^3 + 0,775Stk^2 + 0,22} \quad (1.3)$$

Чем больше Stk , тем больше число столкновений частиц с поверхностью волокна фильтровального материала. Примерная зависимость эффективности улавливания пыли, ε , от критерия Стокса приведена на Рис. 1.12.

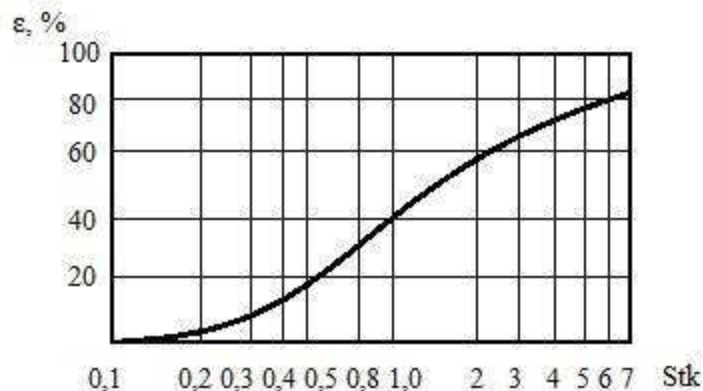


Рис. 1.12. Примерная зависимость эффективности улавливания частиц пыли от критерия Стокса

Влияние данного механизма важно при размере частиц более 1 мкм и зависит от концентрации частиц в потоке воздуха.

Эффект перехвата (касания).

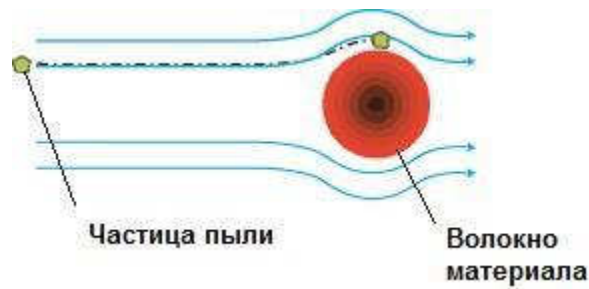


Рис. 1.13. Механизм перехвата

Небольшие легкие частицы следуют с потоком воздуха вокруг волокна фильтра. Если частица движется по линии, проходящей около твердого элемента фильтра на расстоянии, меньшем радиуса частицы или равном ему, она коснется этого элемента и удержится на нем (Рис.1.13). В результате этого столкновения частица теряет скорость и оказывается захваченной волокном. Определяющим параметром эффекта касания является отношение размера частицы r к размеру обтекаемого тела r_0 :

$$R = r/r_0. \quad (1.4)$$

При потенциальном обтекании шара, когда величина R столь мала, что можно пренебречь инерционными эффектами, эффективность механизма перехвата составляет:

$$\eta_R = (1 + R^2) - \frac{1}{1 + R} \approx 3R \quad (1.5)$$

В этом же случае для цилиндра верно соотношение:

$$\eta_R = (1 + R) - \frac{1}{1 + R} \approx 2R \quad (1.6)$$

В другом предельном случае, когда за счет большого значения инерционных эффектов траектории оседающих частиц прямолинейны, имеем следующие соотношения:

для шара

$$\eta_R = (R + 1)^2 - 1 \approx 2R, \quad (1.7)$$

для цилиндра

$$\eta_R = R. \quad (1.8)$$

Таким образом, при потенциальном обтекании цилиндра эффективность механизма перехвата находится в пределах $R \dots 2R$, а при потенциальном обтекании шара $2R \dots 3R$.

Для определения эффективности осаждения частиц за счет касания при вязком обтекании цилиндра справедливы следующие уравнения:

$$\eta_R = \frac{R^2}{1 - \ln \text{Re}_T}, \quad (1.9)$$

$$\eta_R = R^2 \text{Re}_T^{0,0625}, \quad (1.10)$$

где $Re_T = \frac{d_T v_0 \rho_0}{\mu_0}$ – критерий Рейнольдса для обтекаемого тела: d_T – диаметр обтекаемого тела, v_0 – скорость потока, ρ_0 – плотность потока, μ_0 – динамическая вязкость потока

Из приведенных выше уравнений следует, что эффект перехвата становится значительным при осаждении частиц на сферах с малым диаметром. Кроме того, они показывают, что осаждение частиц за счет эффекта перехвата не зависит от скорости газов, но в значительной степени определяется режимом течения газового потока.

Эффект диффузии.

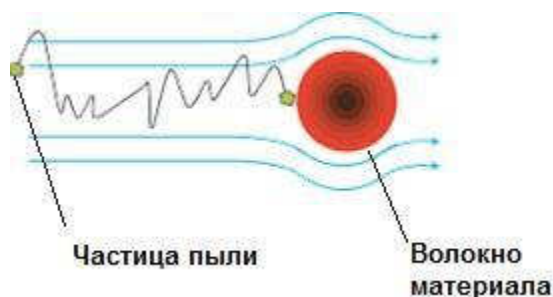


Рис. 1.14. Механизм диффузии

Частицы с малой массой не следуют линиям потока воздуха вокруг волокна фильтра. Их хаотическое движение (известное как броуновское движение) вызвано постоянными столкновениями с другими частицами и молекулами газа, в котором они находятся во взвешенном состоянии. В процессе такого движения частицы могут касаться волокон фильтра (Рис.1.14) или ранее захваченных частиц. На частицы, столкнувшиеся с волокном фильтра или с ранее осевшей частицей, действуют силы, величина которых достаточно велика, чтобы их удерживать. Эффективность этого процесса возрастает при уменьшении скорости, размера и плотности частиц, а также зависит от толщины и площади фильтровального материала. Повышается эффективность и при увеличении плотности фильтрующей среды и уменьшении диаметра волокон. Низкая скорость в среде фильтрации и маленький диаметр волокон уменьшают толщину граничного слоя, через который должны пройти частицы.

Используя теорию случайных блужданий, Ленгмюр получил для коэффициента захвата за счет молекулярной диффузии для одиночного цилиндра (волокна) следующее выражение:

$$\eta_D = 2,32 \left[\frac{1}{2(-1,15 \lg \alpha - 0,4)} \right]^{1/2} Pe^{-2/3} \quad (1.11)$$

где Pe — критерий Пекле, характеризующий относительную роль конвекции и диффузии в подводе частицы к поверхности цилиндра и выводе ее из движущегося потока аэрозоля. $Pe = 2r_0w/D_d$, здесь D_d — коэффициент диффузии, r_0 — размер обтекаемого тела, w — скорость обтекания; α — плотность упаковки.

Коэффициент диффузии D_d резко уменьшается с увеличением размеров частиц, вследствие чего диффузионный эффект достаточно значителен лишь для частиц размером менее 0,1 мкм.

Из приведенных уравнений вытекает, что эффективность диффузионного осаждения возрастает с уменьшением размеров частиц и скорости фильтрации.

Необходимо понимать, что процесс диффузии значительно увеличивает эффективность фильтрации только при применении «бумажных» многослойных фильтров с плотным фильтрующим материалом, состоящим из волокон малого диаметра. С этой точки многие фильтры, например, войлочные и фильтры с длинноволокнистой средой, оказываются непригодными.

В Таблице 1.2 сведены основные принципы механического захвата частиц и факторы, влияющие на эффективность фильтрации [12].

Таблица 1.2. Факторы, влияющие на эффективность механического захвата

Эффект фильтрации	Факторы			
	Скорость воздуха	Размер частиц	Диаметр нити волокна	Плотность волокна
Диффузия	Уменьшение	Уменьшение	Уменьшение	Увеличение
Перехват	Не зависит	Увеличение	Уменьшение	Уменьшение
Инерция	Увеличение	Увеличение	Уменьшение	Увеличение

На Рисунке 1.15 графически представлено влияние эффектов механического захвата частиц на степень очистки воздуха в зависимости от размера частиц [12].

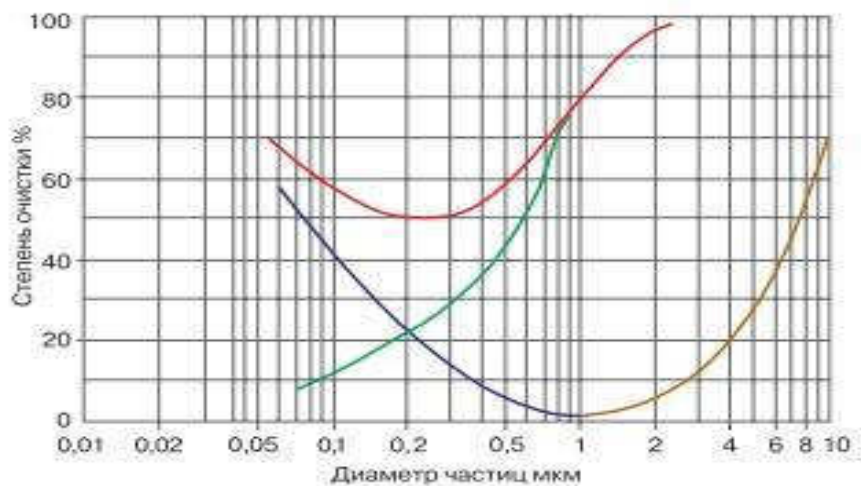


Рис. 1.15. Влияние эффектов механического захвата частиц на степень очистки: кривая зеленого цвета - эффект перехвата; кривая синего цвета - эффект диффузии; кривая коричневого цвета (продолжение синей) - эффект инерции; красная кривая - общая эффективность очистки

Из представленных зависимостей следует, что для частиц размером менее 1 мкм имеет значение только эффект перехвата и диффузии, в то время как для более крупных частиц действуют эффекты инерции и перехвата.

Электростатический механизм.

В случае, если волокно фильтра несет электростатический заряд или поляризовано внешним электрическим полем, оно создает вокруг себя неравномерное электрическое поле. Нейтральные частицы пыли поляризуются этим полем и притягиваются к поверхности волокна, причем знак заряда волокна в этом случае роли не играет. Синтетические материалы, такие как полиэстер, приобретают свой электростатический заряд естественным путем или в процессе производства.

Формула для определения коэффициента захвата в этом случае имеет вид [11]:

$$\eta'_E = \frac{\delta E_0^2 r^2}{6w\mu_0} \quad (1.12)$$

где E_0 — напряженность электрического поля у поверхности волокна; δ — показатель диэлектрических свойств частиц пыли, r — размер частицы, r_0 — размер обтекаемого тела, w — скорость обтекания, μ_0 — динамическая вязкость газа.

Коэффициент электростатического захвата растет с увеличением напряженности поля E_0 и размера частиц r и уменьшается с возрастанием скорости фильтрования, вязкости газа и толщины волокна.

Фильтры, где в качестве фильтровального материала используется синтетические волокна, в процессе эксплуатации теряют свою первоначальную эффективность. На Рис. 1.16 представлены графики изменения эффективности фильтров класса F7 для частиц 0.4 мкм, изготовленных из стекловолоконного и синтетических материалов [12].

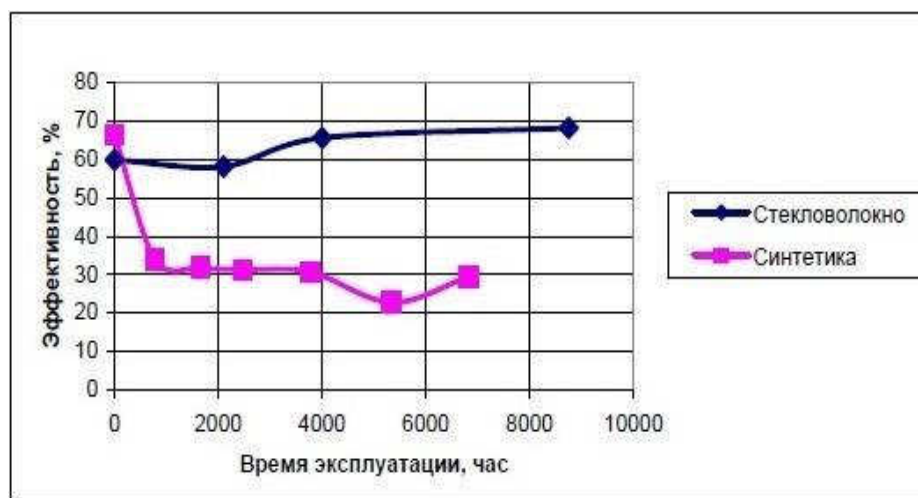


Рис. 1.16. Эксплуатационные параметры синтетических и стекловолоконных фильтров класса F7 с использованием частиц размером 0.4 мкм.

Как видно из представленных графиков, эффективность фильтра, изготовленного из стекловолокна в процессе эксплуатации, не уменьшается, но даже, незначительно, растет. В отличие от стекловолоконного фильтра, эффективность синтетического фильтра в течение первых 400-500 часов работы резко падает, достигая плато эффективности в 30%, а затем вновь снижается. Такое поведение синтетического фильтра объясняется снижением его электростатического заряда, заложенного при его изготовлении.

Процесс фильтрования в наиболее распространенных волокнистых фильтрах можно представить, как движение частиц вблизи изолированного цилиндра (из волокнистого материала), расположенного поперек потока (Рис.1.17). Влиянием соседних волокон пренебрегают. Проходя через фильтрующую перегородку, поток газа разделяется на тонкие непрерывно разъединяющиеся и смыкающиеся струйки. Частицы, обладая инерцией, стремятся перемещаться прямолинейно, сталкиваются с волокнами, зернами и удерживаются ими. Считают, что поток имеет безвихревое движение, а частицы - сферическую форму, частицы при соприкосновении с цилиндрическими волокнами задерживаются на их поверхности. Расстояния между цилиндрическими волокнами весьма значительны по сравнению с размерами частиц (в 5...10 раз превышают размеры частиц).

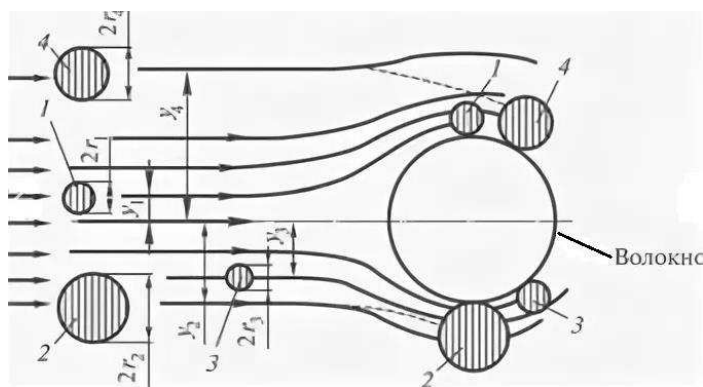


Рис. 1.17. Схема движения частиц аэрозоля при обтекании одиночного волокна: 1 - механизм касания; 2 - инерционный механизм; 3 - диффузионный механизм; 4 - электростатический механизм <https://clck.ru/33SQes>

Суммарный коэффициент захвата.

При обтекании одиночного цилиндра в той или иной степени могут проявляться все рассмотренные выше механизмы осаждения. Однако простое суммирование коэффициентов захвата по различным механизмам не дает точных результатов, так как не учитывает влияния одновременного действия нескольких механизмов на общий коэффициент захвата.

С теоретической точки зрения суммарный коэффициент захвата считается по следующей формуле:

$$\eta'_{\Sigma} = 1 - (1 - \eta'_R)(1 - \eta'_{Stk})(1 - \eta'_D)(1 - \eta'_E) \quad (1.13)$$

где η'_R - коэффициент захвата в условиях перехвата (касания); η'_{Stk} - коэффициент захвата в условиях инерции (столкновения); η'_D - коэффициент захвата в условиях диффузии; η'_E - коэффициент захвата в условиях электростатического поля;

В конкретных условиях суммарный коэффициент захвата η'_{Σ} определяют по наиболее вероятным механизмам осаждения, для которых величина η' максимальна. Остальными второстепенными механизмами осаждения в первом приближении можно пренебречь.

Теперь рассмотрим различные типы частиц, встречающиеся в воздухе. На Рис. 1.18 представлены размеры частиц наиболее значимых примесей, загрязняющих атмосферный воздух, а также типы воздушных фильтров, позволяющие их удалить. Обращает на себя внимание то, что лишь небольшая часть этих частиц доступна для обнаружения невооруженным глазом. Кроме того, можно видеть, что большинство опасных для здоровья человека частиц, например, бактерии, вирусы, масляный и табачный дым,

металлургическая пыль имеют размер менее 1 мкм. Следовательно, качественные фильтры должны отделять именно эти частицы.

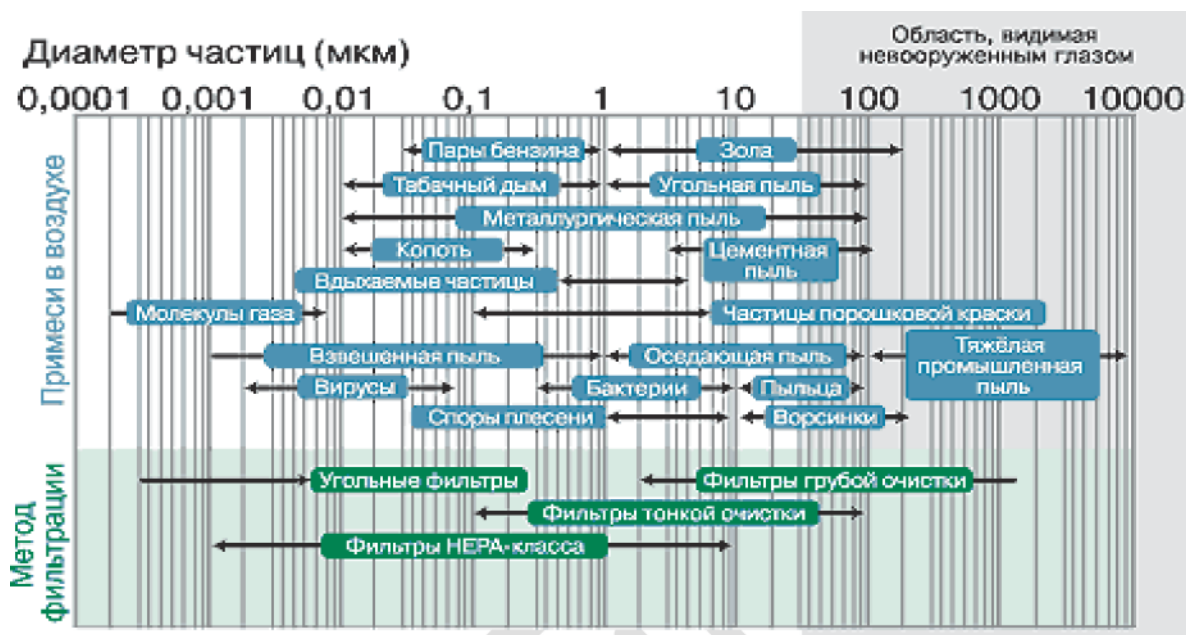


Рис. 1.18. Различные виды частиц в воздухе и фильтры для их удаления

<https://clck.ru/33SUMr>

По мере осаждения частиц на фильтровальном материале уменьшается размер пор и образуется слой пыли с порами значительно меньшими, чем в незапыленном фильтровальном материале. Собственно, рабочим слоем при фильтрации является именно фильтровальный материал с осажденными на нем пылевыми частицами. Он и определяет эффективность очистки. При отложении пыли возрастает гидравлическое сопротивление, снижается эффективность фильтрации. По достижении некоторого значения сопротивления пыль периодически удаляют. Этот процесс называется регенерацией фильтра. Гидравлическое сопротивление слоя осевшей пыли можно определить по формуле Козени-Кармана (Па):

$$\Delta p = k_c \mu_0 v_0 G(1 - m_p)/(d_c^2 m_p^3 \rho_c), \quad (1.14)$$

где k_c - коэффициент, принимаемый для пыли с диаметром частиц $d_c < 6$ мкм равным 240; G - масса пыли, содержащейся в порах фильтровального материала, отнесенная к единице площади фильтра; m_p - пористость слоя пыли, равная $m_p = (\rho_c - \rho_n)/\rho_c$, здесь ρ_c - плотность частиц; ρ_n - плотность насыпного слоя; d_c - диаметр частиц пыли., μ_0 - динамическая вязкость газа.

Гидравлическое сопротивление слоя осевшей пыли толщиной 1 мм в зависимости от дисперсного состава можно определить по графику (Рис. 1.19). При осаждении тонких фракций, как видно из графика, сопротивление значительно выше.

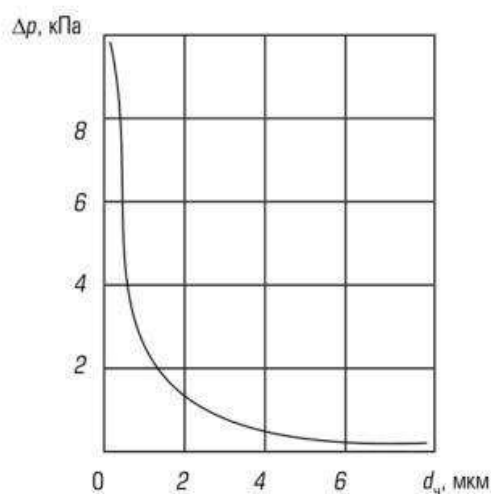


Рис.1.19. Изменение гидравлического сопротивления слоя пыли толщиной 1 мм в зависимости от дисперсности. Скорость фильтрации $W = 1$ м/мин. <https://clck.ru/33SQnr>

Приведенные зависимости дают в основном качественную картину процесса осаждения в фильтрах и позволяют судить о роли основных факторов, влияющих на процесс. В реальных условиях процесс осаждения пылевых частиц в фильтрах сопровождается коагуляцией частиц и соответствующим изменением проницаемости слоя и, следовательно, эффективности фильтра. Из-за сложности процесса в фильтрах практически невозможно определить влияние всех факторов на параметры фильтрации. Обычно при определении эффективности очистки и гидравлического сопротивления фильтра пользуются данными, полученными на основе обобщения результатов экспериментальных исследований.

Также, стоит заметить, что в реальных условиях эксплуатации коэффициенты захвата зависят от материала, из которого изготовлен фильтр и от местных климатических условий.

1.3. Анализ стандартов и ГОСТ, регламентирующих требования к воздушным фильтрам

Второе десятилетие 21 века ознаменовалось выходом в свет нескольких новых стандартов, устанавливающих требования к воздушным фильтрам и определяющих их классификацию. Каждый из этих стандартов устанавливает свои методы тестирования фильтра - элементов. Инженерному персоналу энергетических компаний порой бывает затруднительно разобраться в многообразии и особенностях этих стандартов. Проанализируем назначение этих стандартов и классификацию воздушных фильтров, осуществленную по методикам испытаний, предложенным в этих нормативных документах.

1.3.1. Стандарты для тестирования высокоэффективных фильтров

В 2009 году вышел в свет европейский стандарт EN 1822-1-2009 (High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) - Part 1: Classification, Performance testing, marking), который установил требования к эффективным, высокоэффективным и сверхэффективным фильтрам [13]. Он содержит методику определения эффективности фильтров с использованием контрольного аэрозоля и счетчика частиц для выполнения классификации фильтров по показателям эффективности (локальной и интегральной) для частиц MPPS (размер частиц, для которых эффективность частиц минимальная).

Фильтры классифицируются по их эффективности или проскоку частиц на группы:

- E- эффективные EPA (Efficient Particulate Air Filter);
- H – высокоэффективные HEPA (High Efficient Particulate Air Filter);
- U- сверхэффективные ULPA (Ultra Low Penetration Air filter).

Фильтры каждой группы разделяются на классы в зависимости от их эффективности.

В данном стандарте, по сравнению с предыдущим, фильтры классов H10-H12 группы HEPA переквалифицированы в группу EPA. В группе HEPA остались фильтры классов H13 и H14. Остальные фильтры по – прежнему относятся к группе ULPA. Отмечено, что фильтры группы E не могут и не должны испытываться на проскок (протечку) для их классификации.

29 декабря 2010 года в Российской Федерации был утвержден и введен в действие национальный стандарт ГОСТ Р EN 1822-2010, полный аналог европейского стандарта EN 1822-1-2009. В течение последующих четырех лет в нашей стране последовало введение в действие остальных частей стандарта EN 1822.

ГОСТ Р EN 1822-2-2012 Часть 2. Генерирование аэрозолей, испытательное оборудование, статистика счета частиц.

ГОСТ Р EN 1822-3-2012 Часть 3. Испытания плоского фильтрующего материала.

ГОСТ Р EN 1822-4-2012 Часть 4. Испытания фильтров на утечку (метод сканирования).

ГОСТ Р EN 1822-5-2014 Часть 5. Определение эффективности фильтрующих элементов.

В октябре 2011 года Международная Организация Стандартизации (ISO) опубликовала стандарт ISO 29463 “High-efficiency filters and filter media for removing particles in air” [14] с целью упорядочить различные стандарты для фильтров, используемые в США и Европе. До момента этой публикации ISO 29463 существовал параллельно с EN 1822 и американскими тестовыми процедурами.

Последний раз стандарт ISO 29463 был пересмотрен в 2017 году (вторая редакция). Стандарт ISO 29463:2017 «Фильтры высокоэффективные и фильтрующие материалы для удаления частиц в воздухе», как и в первой редакции состоит из пяти частей:

Часть 1. Классификация, эффективность, испытания и маркировка.

Часть 2. Статистика по производству аэрозолей, измерительному оборудованию и подсчету частиц.

Часть 3. Тестирование плоского листа фильтровального материала.

Часть 4. Метод тестирования по определению протечки фильтр-элементов – скан метод.

Часть 5. Метод тестирования фильтр-элементов.

Новый стандарт берет свои истоки из EN 1822, но, при этом, определяет 13 различных классов фильтров, ранжируемых их от ISO 15 E до ISO 75 U (Рис.1.20).



Рис. 1.20. Соотношение двух стандартов (<https://clck.ru/33TfLL>)

ISO 29463, полученный из EN 1822, имеет целью внести ясность в путаницу этих стандартов. EN 1822, в свою очередь, определяет классы фильтров EPA, HEPA и ULPA, которые обычно встречаются в промышленном использовании.

Стандарт ISO 29463 поддерживает обозначения EPA, HEPA и ULPA и наряду с этим заменяет классы фильтров E10-E12, H13-H14 и U15-U17 на следующие 13 классов фильтров. В табл.1.3. представлена классификация высокоэффективных фильтров по ISO 29463.

Обозначения	Группы фильтров по ISO 29463
EPA фильтр (эффективный воздушный фильтр для задержания частиц)	ISO 15 E - ISO 30 E
HEPA фильтр (высокоэффективный воздушный фильтр для задержания частиц)	ISO 35 H - ISO 45 H
ULPA фильтр (воздушный фильтр с ультра низким проникновением)	ISO 50 U - ISO 75 U

Табл. 1.3. Классификация фильтров по ISO 29463.

Стандарт EN 1822-1 «Классификация, тестирование рабочих характеристик, маркировка» продолжит существовать на Европейском уровне в пересмотренной версии. Пересмотренный стандарт будет соотноситься с частями 2-5 стандарта ISO 29463. Проще говоря, EN 1822 будет обладать своей собственной классификационной системой (Часть 1) для воздушных фильтров, но будет тестировать их согласно стандарта ISO 29463 Части 2-5. Тем не менее, сохранится одно различие между тестовыми методами на протекание, установленными в этих двух стандартах. В то время как ISO 29463:2017 часть 1 определяет пять методов, то стандарт EN 1822-1 предусматривает только четыре (Табл.1.4).

Требования стандарта EN 1822 части 1, касающиеся тестирования фильтров для задержания частиц примесей, строже, чем изложенные в стандарте ISO 29463. EN 1822 открыто исключает использование аэрозольных экспонетров (фонометров). В качестве

ремарки целесообразно отметить, что тестовые процедуры с использованием PSL очень недешевы и поэтому редко применяются.

Различия между EN 1822 и ISO 29463

Как было указано выше, ISO 29463 охватывает фильтр-классы EPA, HEPA и ULPA EN 1822, как определено в стандарте EN 1822. Оценивание в новом стандарте ISO также базируется на улавливании частиц самого проникающего размера (MPPS). MPPS представляет собой размер частиц, под проникающим действием которых воздушный фильтр обнаруживает самую низкую степень их удержания. Однако, существует одно различие в классификации фильтров между этими двумя стандартами (Табл.1.4).

Табл.1.4. Сравнение методов тестирования фильтров по ISO 29463 и EN 1822

ISO 29463 Часть 1: в соответствии с конструкцией фильтра	EN 1822 Часть 1: в соответствии с конструкцией фильтра
Обнаружение протечек методом сканирования с помощью счетчика частиц	Обнаружение протечек методом сканирования с помощью счетчика частиц
Тест на протечку «масляной нитью»	Тест на протечку «масляной нитью»
Тест на эффективность удержания частиц размером от 0.3 μm до 0.5 μm	Тест на эффективность удержания частиц размером от 0.3 μm до 0.5 μm , только для фильтров класса H13.
Аэрозольный фотометрический метод на протечку	Нет
Тест на протечку с помощью PSL (полистирольный латекс - сферические твердые частицы)	PSL может использоваться в качестве альтернативы при тесте на проскок (протечку)

EN 1822 классифицирует фильтр для задержания частиц примесей с уровнем улавливания, например 99.9993% с его MPPS, как HEPA фильтр класса H14. С другой стороны, при оценке этого же фильтра согласно ISO 29463 он классифицируется как ULPA

фильтр класса ISO 50U. Являясь фильтром ULPA по ISO 29463, он подлежит другим процедурам тестирования на протекание, чем в случае с его классификацией по стандарту EN 1822. Более того, ISO 29463 начинается с группы фильтров ISO 15E, что эквивалентно классу фильтра E11 согласно стандарта EN 1822. Соответственно, он не покрывает аналог фильтру EPA класса E10. В противоположность эквивалентом фильтр-классу E10 показывается тестовый стандарт ISO 16890 с группой фильтров ISO ePM₁ >95%. (Табл.1.5).

Для нужд электроэнергетики представляют интерес фильтры группы E, рекомендованные многими производителями ГТУ в качестве конечной (финишной) ступени фильтрации воздуха в комплексных воздухоочистительных устройствах (КБОУ).

Табл.1.5. Сравнение между классами фильтров по ISO 29463 и EN 1822

Группы фильтров по EN 1822	Группы фильтров по ISO 29463	Общая величина		Местная величина	
		Эффективность	Проникивание	Эффективность	Проникивание
E10	-	≥ 85%	≤ 15%	-	-
E11	ISO 15 E	≥ 95%	≤ 5 %	-	-
	ISO 20 E	≥ 99%	≤ 1%	-	-
E12	ISO 25 E	≥ 99.5%	≤ 0.5%	-	-
	ISO 30 E	≥ 99.90%	≤ 0.1%	-	-
H13	ISO 35 H	≥ 99.95%	≤ 0.05%	≥ 99.75%	≤ 0.25%
	ISO 40 H	≥ 99.99%	≤ 0.01%	≥ 99.95%	≤ 0.05%
H14	ISO 45 H	≥ 99.995%	≤ 0.005%	≥ 99.975%	≤ 0.025%
	ISO 50 U	≥ 99.999%	≤ 0.001%	≥ 99.995%	≤ 0.005%
U15	ISO 55 U	≥ 99.9995%	≤ 0.0005%	≥ 99.9975%	≤ 0.0025%
	ISO 60 U	≥ 99.9999 %	≤ 0.0001%	≥ 99.9995%	≤ 0.0005%
U16	ISO 65 U	≥ 99.99995%	≤ 0.00005%	≥ 99.99975%	≤ 0.00025%
	ISO 70 U	≥ 99.99999%	≤ 0.00001%	≥ 99.9999%	≤ 0.0001%
U17	ISO 75 U	≥ 99.999995%	≤ 0.000005%	≥ 99.9999%	≤ 0.0001%

1.3.2. Стандарты для тестирования фильтров общего назначения и систем вентиляции

В 2012 году вступил в силу стандарт EN 779: 2012 (Particulate air filters for general ventilation - Determination of the filtration performance) [15]. Методы испытаний фильтров, изложенные в этом стандарте, разработаны на основе старого стандарта EN 779: 2002.

В 2014 году в Российской Федерации был принят ГОСТ Р EN 779-2014 «Фильтры общего назначения. Определение технических характеристик», который является аналогом нового европейского стандарта. Новый российский национальный стандарт заменил, в свою очередь, ГОСТ Р EN 779-2007.

Настоящий стандарт устанавливает классификацию фильтров очистки воздуха общего назначения и методы определения их технических характеристик.

Методы испытаний, приведенные в этих документах, разработаны на основе стандарта EN 779:2002.

Для классификации фильтров следует проводить испытания с применением двух синтетических аэрозолей, одним из которых является мелкодисперсный аэрозоль для определения эффективности фильтрации как функции размера частиц от 0.2 до 3.0 мкм, вторым - крупнодисперсная пыль ASHRAE для определения пылеемкости фильтра. При испытаниях фильтров грубой очистки эффективность фильтрации определяется по пылезадерживающей способности.

Для тестирования фильтров на эффективность используется контрольный аэрозоль DEHS или его аналог. Эффективность фильтр-элемента определяется отношением концентрации частиц в воздухе до и после него с помощью оптического счетчика частиц. Настоящий стандарт устанавливает требования к фильтрам с начальной эффективностью менее 98 % для частиц с размером 0,4 мкм.

В новом стандарте и ГОСТ изменена классификация фильтров, используемая ранее. Вместо двух групп фильтров G (грубой) и F (тонкой) очистки, введена третья группа M-фильтры средней очистки. Фильтры тонкой очистки класса (fine filter) F5 и F6, по старому стандарту EN 779: 2002, переклассифицированы в фильтры средней очистки (middle filter) M5 и M6.

Определено значение конечного перепада давления для фильтров грубой очистки 250 Па, фильтров средней и тонкой очистки – 450 Па. По средней эффективности или средней пылезадерживающей способности фильтры классифицируются при расходе воздуха 3400 м³/ч (0,944 м³/с), если изготовитель не задает иное.

Если средняя эффективность фильтра E_m (average efficiency) ниже 40% для частиц размером 0,4 мкм, то его относят к группе G, внутри которой класс присваивается по средней пылезадерживающей способности. При E_m от 40% до 80% для частиц такого же размера фильтры относят к группе M, а при 80% и выше к группе F. Кроме того, воздушные фильтры тонкой очистки классифицируются и на основании минимальной эффективности фильтрации ME (minimal efficiency) для частиц размером 0,4 мкм.

В этом стандарте и ГОСТ установлено, что начальная (с электростатическим зарядом) и конечная (после снятия заряда) эффективность должна быть измерена и указана для оценки фактических эксплуатационных характеристик фильтра. Поэтому определение эффективности фильтр-элемента должно осуществляться в два этапа: первоначально производится испытание нового заводского фильтра, затем фильтр обрабатывают изопропанолом для снятия электростатического заряда и только после этого производится повторный тест.

Это сделано для того, чтобы покупатель данной продукции знал о возможном ухудшении технических характеристик, происходящих из-за потерь фильтрующим материалом электростатического заряда в течении срока службы фильтр-элементов.

Согласно стандартам EN 779:2012 и EN 1822:2009 каждый фильтр должен иметь маркировку, содержащую следующие данные:

- наименование, торговая марка и данные об изготовителе;
- тип и исходный номер фильтра;
- стандарт, которому он соответствует;
- группа и класс фильтра, согласно стандарту;
- расход воздуха, при котором фильтр был квалифицирован.

Если правильная установка фильтра в воздухопровод не очевидна, то в маркировке необходимо указать направление потока воздуха и верх фильтра.

Прошло всего пять лет после введения европейского стандарта EN 779:2012 и два года с начала действия российского ГОСТ Р EN 779:2014, который полностью идентичен европейскому, как Международная Организация по Стандартизации (ISO) опубликовала новый, знаковый для области воздушной фильтрации стандарт ISO 16890 «Фильтры очистки воздуха общего назначения» [16]. В стандарте ISO 16890 описывается процедура тестирования и система классификации воздушных фильтров для общеобменных систем вентиляции. Новый стандарт предоставляет возможность глобальной гармонизации, поскольку он заменил два существующих стандарта: ASHARE 52.2, который используется в США и EN 779:2012, применяемый в Европе.

1 января 2017 года стандарт ISO 16890 вступил в силу и действовал наравне со

стандартами ASHARE 52.2 и EN 779:2012 во время установленного переходного периода до 30 июня 2018 года [17].

С ГОСТ Р EN 779-2014 сложилась парадоксальная ситуация – на данный момент он является действующим в РФ, хотя его аналог стандарт EN 779: 2012 отменен в Европе уже 5 лет назад.

Все эти годы мы ожидали, что в ближайшее время последует отмена этого отечественного ГОСТа и будет осуществлен переход на российский аналог стандарта ISO 16890. 1 января 2023 года в нашей стране был введен Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 70061-2022 «Фильтры очистки воздуха общего назначения» (1-4 части) [18], который является модифицированным по отношению к международному стандарту ИСО 16890:2016. При этом ГОСТ Р EN 779-2014 до настоящего времени является действующим.

Мы не беремся комментировать ситуацию, возникшую с отечественными стандартами в области воздушной фильтрации, поскольку логическому объяснению она не подлежит.

Зададимся вопросом – зачем менять относительно недавно принятый стандарт EN 779:2012, к которому уже все привыкли? Основной проблемой классификации воздушных фильтров по стандарту EN 779:2012 является удаленность его от реальности. По данному стандарту эффективность воздушного фильтра оценивалась с помощью синтетической лабораторной пыли. Однако, такая оценка применима только для частиц размером 0,4 мкм. В действительности же в воздушные фильтры поступают частицы разной дисперсности. По этой причине данные, полученные при тестировании фильтров в лабораториях, имели ограниченное значение, с точки зрения, фактических характеристик воздушных фильтров.

В результате ограниченности стандарта EN 779:2012 воздушный фильтр мог соответствовать классу F7 по частицам 0,4 мкм, даже имея низкую начальную эффективность, равную 35%. При этом, увеличение загрузки фильтра пылью в процессе лабораторных испытаний вызывал рост его эффективности.

Стандарт ISO 16890, как и ГОСТ Р 70064-2022 состоит из четырех частей:
Часть 1: Технические характеристики, требования и система классификации, основанная на эффективности улавливания взвешенных частиц (ePM) (*particulate matter efficiency*);
Часть 2: Определение фракционной эффективности и перепада давления;
Часть 3: Определение зависимости эффективности и перепада давления от массы уловленной пыли;

Часть 4: Метод кондиционирования для определения минимальной фракционной эффективности

В практику применения данный стандарт вводит:

- измерение фракционной эффективности;
- разряжение фильтра;
- гравиметрический тест (при необходимости);
- классификация фракций по ePM.

PM (particulate matter) – это общее количество взвешенных в воздухе твердых частиц размером меньше 10, 2.5 и 1 мкм, выраженное в мкг/м³ (рис.1.21).

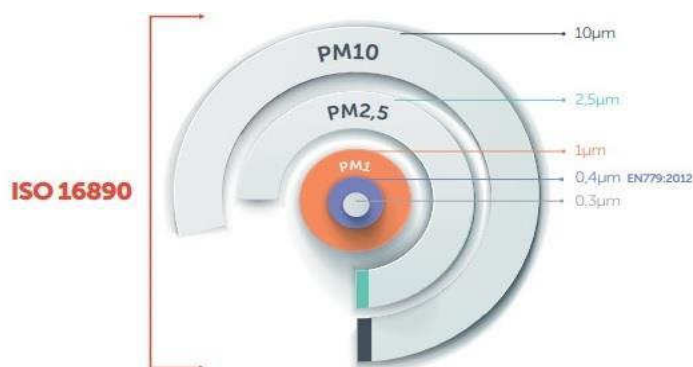


Рис.1.21. Взаимосвязь размеров PM и мкм (µm) [19].

В табл.1.6 приведено сопоставление стандартов ГОСТ Р EN 779:2014 и ГОСТ Р 70064-2022.

Табл.1.6. Сравнение стандартов ГОСТ Р EN 779:2014 и ГОСТ Р 70064-2022

	ГОСТ Р EN 779:2014	ГОСТ Р 700640:2022
Размер частиц для классификации	0,4 мкм	0,3 – 1 мкм (PM1) 0,3 – 2,5 мкм (PM2,5) 0,3 – 10 мкм (PM10)
Тестовый аэрозоль	DEHS (диэтилгексилсебацат)	DEHS / 0,3 – 1 мкм KCL (хлорид калия) / 1 – 10 мкм
Электростатический разряд с IPA (изопропиловый спирт)	Материал полностью погружается в спирт	Образец (весь фильтр) обрабатывается парами изопропанола
Эффективность фильтра после снятия заряда	Сравнение образца и фильтра	Средняя эффективность обработанного и необработанного фильтра

Подача пыли для классификации	Постепенная подача пыли	Классификация без подачи пыли
Тестовая пыль для ISO Coarse и энергоэффективности	ASHRAE	ISO fine
Подача пыли	70 мг/м ³	140 мг/м ³
Тестовый финальный перепад давления	G1, G2, G3, G4 = 250 Па	PM10 < 50% = 200 Па
	M5, M6, F7, F8, F9 = 450 Па	PM10 ≥ 50% = 300 Па
Классификация	G1 – G4 M5 – M6 F7 – F9	ISO Coarse ISO ePM10 ISO ePM2,5 ISO ePM1

Согласно ISO 16890 (ГОСТ Р 70064-2022) оценка фильтра будет выглядеть, к примеру, как ISO ePM₁₀ 80%, что означает улавливание фильтром 80% частиц фракции PM10. Приставка “e” означает эффективность фильтрации по данной фракции.

Процедура тестирования по стандарту ISO 16890 (ГОСТ Р 70064-2022) начинается с измерения фракционной эффективности воздушного фильтра в диапазоне частиц от 0,3 до 10 мкм. После этого фильтр подвергается воздействию паров изопропанола, чтобы оценить в какой степени задержание частиц зависит от электростатического заряда. Затем процедура определения эффективности вновь повторяется. Из среднего значения двух полученных фракционных кривых вычисляется эффективность ePM₁ для диапазона частиц до 1 мкм и ePM_{2.5} для частиц до 2.5 мкм.

На основании полученных результатов воздушные фильтры делятся на четыре группы: PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ и фильтры грубой очистки. Обязательным для каждой группы является задержание фильтром по меньшей мере 50% частиц соответствующего диапазона размеров. Если фильтр, например, захватывает более 50% частиц PM₁, он будет классифицироваться как фильтр ISO ePM₁. Затем соответствующая эффективность округляется с шагом 5%.

Средняя пылездерживающая способность фильтров с эффективностью PM₁₀ менее 50% определяется при конечном перепаде давления 200 Па, а для фильтров с PM₁₀ ≥ 50% - 300 Па.

В табл.1.7 приведена классификация воздушных фильтров по стандарту ISO 16890 (ГОСТ Р 70061-2022).

Таблица 1.7 Классификация фильтров по стандарту ISO 16890

Классификация PM1	Классификация PM2,5	Классификация PM10	Фильтры грубой очистки
ePM1 [95%] ePM1 [90%] ePM1 [85%] ePM1 [80%] ePM1 [75%] ePM1 [70%] ePM1 [65%] ePM1 [60%] ePM1 [55%] ePM1 [55%]	ePM2,5 [95%] ePM2,5 [90%] ePM2,5 [85%] ePM2,5 [80%] ePM2,5 [75%] ePM2,5 [70%] ePM2,5 [65%] ePM2,5 [60%] ePM2,5 [55%] ePM2,5 [55%]	ePM10 [95%] ePM10 [90%] ePM10 [85%] ePM10 [80%] ePM10 [75%] ePM10 [70%] ePM10 [65%] ePM10 [60%] ePM10 [55%] ePM10 [55%]	Пылезадерживающая способность с 5% интервалом, начиная с 5%
Требования >50% начальная эффективность >50% эффективность разряженного фильтра	Требования >50% начальная эффективность >50% эффективность разряженного фильтра	Требования >50% начальная эффективность Нет требований по разряжению	Нет требований по разряжению

Требования по разряжению фильтров PM₁₀ и фильтров грубой очистки по данному стандарту отсутствуют. Минимальные значения эффективности ePM_{1min} и ePM_{2.5min} рассчитываются по фракционной кривой, полученной после обработки фильтра изопропанолом (Табл.1.8).

Табл.1.8. Обзор классификации фильтров по ISO 16890 (ГОСТ Р 70061-2022)

Группа	Требования			Указываемый параметр
	ePM1, min	ePM2.5, min	ePM10	
ISO Coarse	-	-	<50%	Начальная пылезадерживающая способность
ISO ePM10	-	-	≥50%	ePM10
ISO ePM2.5	-	≥50%	-	ePM2.5
ISO ePM1	≥50%	-	-	ePM1

Указываемая эффективность = средняя эффективность между начальной эффективностью и эффективностью разряженного фильтра

С введением стандарта ISO 16890 (ГОСТ Р 70061-2022) более корректно учитываются реальные условия эксплуатации. Новый стандарт рассматривает спектр частиц размеров от 0,3 до 10 микрон в соответствии с классификацией фракций. В старом стандарте классификация фильтров осуществлялась только для частиц размером 0,4 мкм. Основываясь на оценках нового стандарту, пользователи смогут выбрать фильтры, наиболее подходящие их индивидуальным требованиям.

Ряд западных производителей воздушных фильтров привели соответствие своей продукции новому стандарту ISO 16890.

В табл.1.9 представлено соотношение некоторых фильтров немецкой компании Freudenberg Filtration Technology (торговая марка Viledon) по старому и новому стандартам [20].


Табл.1.9. Пример классификации фильтров Viledon

Фильтр	EN 779	ISO 16890
T 60	M6	ISO ePM10 60 %
MX 85	F7	ISO ePM2,5 65%
MX 98	F9	ISO ePM1 85 %

Компания Camfil Svenska (Швеция) приобрела и установила в своей лаборатории первый в мире стенд для испытания воздушных фильтров по новому стандарту ISO 16890. На основании результатов тестов, выполненных на этом стенде, в табл.1.10 представлено соотношение воздушных фильтров средней и тонкой очистки по стандартам EN 779:2012 и ISO 16890 [21].

Табл.1.10. Соотношение фильтров по стандартам EN 779:2012 и ISO 16890

Filter class	PM1	PM2.5	PM10
M5	<20%	<40%	>50%
M6	<40%	50-60%	>60%
F7	50-75%	>70%	>80%
F8	70-85%	>80%	>90%
F9	>85%	>90%	>95%



Как видно, из представленных данных фильтр класса M5 по стандарту EN 779:2012 не может быть классифицирован как ePM₁ и ePM_{2.5} по ISO 16890 в связи с низкой эффективностью (менее 50%) по улавливанию частиц этой дисперсности. Аналогичная

ситуация складывается с фильтром средней очистки класса М6 по стандарту EN 779:2012, который не соответствует ePM₁.

Это еще раз говорит о том, что эффективность, по которой воздушные фильтры оцениваются в соответствии с новым стандартом, зависит от их качества и в каждом конкретном случае определяется индивидуально. Таким образом, диапазон эффективности воздушных фильтров в одной группе различных производителей может отличаться. Более того, если сравнить данные табл.1.9 по группе ePM₁ одного производителя, то получается, что максимальная эффективность фильтров F7 превышает начальную эффективность фильтров F8.

Вероятно, в таком случае ряд фильтров класса F7 этого производителя должны квалифицироваться как фильтры F8, а какая-то часть фильтр-элементов F8 с 70% переведены в класс F7.

В любом случае в новом стандарте каждый фильтр имеет одну квалификацию, наилучшую из того, что была получена в результате тестирования. Например, если фильтр имеет эффективность 55% по PM₁, ePM_{2.5} 80% и ePM₁₀ 90%, то на его этикетке будет стоять ePM₁ 55%. Если же эффективность фильтра 45% по PM₁, 80% по PM_{2.5} и 90% по PM₁₀, то маркировка воздушного фильтра будет ePM_{2.5} 80%. Такая информация позволит потребителю, хорошо знающему климатические условия эксплуатации своей системы воздухоочистки (дисперсность, концентрацию частиц в воздухе), правильно выбрать наиболее эффективные воздушные фильтры. Потребитель, не обладающий такой информацией, может потратить значительные материальные средства для закупки совсем не нужного оборудования. Следовательно, мониторинг окружающей среды, в которых эксплуатируются энергетические ГТУ является ключём для правильных технических решений при выборе воздушных фильтров для своего энергетического оборудования.

1.3.3. Стандарт для воздушных фильтров, используемых в роторных механизмах

В 2013 году в Европе вступает в силу стандарт ISO 29461-1:2013 (Air intake filter systems for rotary Machinery — Test methods — Part 1: Static filter elements. MOD). Международный стандарт разработан Техническим комитетом ISO/TC 142 [22]. Стандарт устанавливает методы и процедуры определения характеристик фильтров, используемых в воздушных системах роторных механизмов, таких как стационарные газотурбинные двигатели, компрессоры и другие стационарные двигатели внутреннего сгорания. Обзор процедуры

тестирования приведен в таблице 1.11.

Табл.1.11. Процедуры тестирования фильтров

Метод испытания	Диапазон размеров	Аэрозоль тестирования	Кондиционирование	Загрузка пыли в два этапа (первый шаг 50г)	Конечный перепад давления теста Па (в WG)
Эффективность частиц	0.3-3.0 мкм	DEHS	Да	ISO тонкая (140 мг/м ³) (4.0 г/1000 фут ³) [два шага]	625 (2.5)
Гравиметрическая эффективность	ISO 12103-A2	ISO 12103-A2	Да	ISO тонкая (140 мг/м ³) (4.0 г/1000 фут ³) [два шага]	375 (1.5)

Это относится к воздушным фильтрам, имеющим начальную эффективность частиц не более 99,9% относительно частиц 0,4 мкм. Фильтры с более высокой эффективностью частиц следует тестировать и классифицировать в соответствии с требованиями других стандартов (EN1822-5).

Данный стандарт следует применять к статическим (барьерным) фильтрам, а также к другим типам фильтров и систем при соответствующих условиях.

В настоящем стандарте использованы два метода определения эффективности:

- * эффективность частиц (измеренная по количеству и размеру частиц) -Е;
- гравиметрическая эффективность (процентное соотношение массы загружаемой пыли) - А.

Для определения влияния электростатического заряда на эффективность очистки из одного из двух фильтров предоставленного на испытания берется образец плоского фильтрационного материала, который подвергается кондиционированию (разряжению) в течение 24 часов. Как и в стандарте EN 779:2012, эффективность очистки воздуха определяет до и после процедуры кондиционирования.

Определение процентной эффективности очистки воздуха при заданных размерах частиц, с помощью аэрозоля DEHS осуществляется с помощью оптического счетчика частиц в диапазоне от 0.3 до 3.0 мкм. Для всех фильтров измерение эффективности должно выполняться для частиц размером 0.4; 0.6; 0.8 и 1.2 мкм.

Для фильтров средней и высокой эффективности (начальная эффективность частиц $\geq 35\%$ при размере частиц 0,4 мкм) устанавливается следующая процедура тестирования:

- измерение начальной эффективности аэрозолем DEHS для частиц в диапазоне от 0.3 до 3.0 мкм для фильтра;

- измерение условной эффективности аэрозолем DEHS в диапазоне от 0.3 до 3.0 мкм для среды;
- двухступенчатая загрузка с помощью пыли по ISO A2 (140 мг/м³) до окончательного испытательного падения давления 625 Па (2.5 дюйма WG) в соответствии с процедурой загрузки;
- испытание эффективности с аэрозолем DEHS после каждой стадии загрузки пыли фильтра;
- определение гравиметрической эффективности в соответствии с процедурой загрузки.

Испытание фильтров с низкой начальной эффективностью частиц (менее 35 % при размере частиц 0,4 мкм) должно быть проведено после установки окончательного испытательного падения давления не выше 375 Па (1.5 дюйма в WG) фильтры.

Гравиметрическая эффективность определяется методом загрузки тестируемого фильтра пылью в два этапа. Мелкодисперсную пыль ИСО следует подавать в концентрации 140 мг/м³ (4.0г/1000 фут³) до тех пор, пока не будет достигнуто окончательное падение давления. Первоначально подается 50 г тонкой пыли ISO A2, после чего фильтр взвешивается с точностью $\pm 0,1$ г. Вычисляется гравиметрическая эффективность A_{50} (gravimetric efficiency): взвешенное (массовое) удаление загружаемой пыли, объемом, превышающим 50 г пыли. После этого выполняется загрузка второй частиц тонкой пыли. Оценивается средняя гравиметрическая эффективность A_{avg} (average gravimetric efficiency): Отношение общего количества загружаемой пыли, удерживаемой фильтром, к общему количеству пыли, подаваемой до окончательного испытательного падения давления.

Все фильтры следует проверять в одинаковом режиме; однако если установлено, что конкретный фильтр имеет низкий коэффициент эффективности (фильтры с начальной эффективностью частиц <35 % при размере частиц 0.4 мкм), то при окончательной проверки падения давления этот может быть испытан до 375 Па (1.5 дюйма WG) вместо 625 Па (2.5 дюймов WG).

Эффективность загруженного пылью фильтра определяют следующим образом:

- а) значения эффективности частиц следует регистрировать после загрузки 50 г тонкой пылью ISO A2 и после того, как пыль загрузила испытательный фильтр до окончательного падения давления;
- б) гравиметрические значения эффективности следует регистрировать после загрузки тестового фильтра не более 50 г пылью ISO A2.

Эффективность частиц E для заданного диапазона размеров частиц (между двумя

диаметрами частиц) рассчитывают по формуле

$$E = 1 - N_d / DR * Nu,$$

где N_d - количество частиц в диапазоне размеров « i » после фильтра;

DR — коэффициент разбавления;

Nu — количество частиц в диапазоне размеров « i » перед фильтром.

Гравиметрическую эффективность A_{50} при загрузке пыли 50 г рассчитывают по формуле:

$$A_{50} = (1 - m_{p50} / m_{50}) 100 [\%],$$

где m_{p50} - масса пыли, которая прошла через фильтр (прирост конечной массы фильтра и пыли в канале между фильтром и последним фильтром) после загрузки пыли 50 г;

m_{50} - масса пыли, подаваемой во время первой загрузки пыли (50 г).

Максимальный весовой коэффициент, который может быть установлен, составляет 99 %.

Более высокие значения должны сообщаться как >99 %.

Стандарт ISO 29461 “Air intake filter systems for rotary Machinery” состоит из несколько частей:

В части 2 приведены методы испытания очищающихся (импульсных) фильтров;

Часть 3 содержит методы определения механической целостности фильтров в условиях, которые могут возникнуть в ненормальных условиях эксплуатации;

В части 4 описаны методы тестирования установленных фильтров в условиях эксплуатации (тестирование на месте);

Часть 5 охватывает методы испытаний для конкретных требований морского применения и методы определения эффективности удаления морской соли из отдельных фильтров и/или полных фильтрующих систем;

Часть 6 содержит методы испытаний для очищаемых фильтрующих элементов, за исключением тестирования системы.

Только через шесть лет, в 2019 году в Российской Федерации был впервые введен в действие национальный стандарт ГОСТ Р 58499-2019 (ИСО 29461-1:2013) «Системы очистки воздуха, подаваемого в роторные установки. Методы испытаний. Часть 1. Статические фильтрующие элементы», который является модифицированным по отношению к международному стандарту ISO 29461-1:2013. Данный стандарт не дает классификации фильтров, а только рекомендует методики их проверки. В данном стандарте используется классификация фильтров аналогичная стандарту EN 779: 2012: фильтры низкой, средней и высокой эффективности. Очевидно, что выход в свет этого стандарта в нашей стране явно запоздал. И вот по какой причине.

ISO 29461:2013 занимает промежуточное положение между EN 779: 2012 и ISO 16890 не только по хронологии вступления в силу стандартов, но и по своему содержанию. Он опирается на терминологию EN 779: 2012, но в отличие от двух других документов не дает классификации фильтров, а только определяет методики их испытаний.

В табл.1.12 приведено сравнение действующих в РФ стандартов ГОСТ Р EN 779: 2014, ГОСТ Р 58499-2019 (ISO 29461-1:2013) и ГОСТ Р 70061-2022 (ISO 16890) [23].

Табл.1.12. Сравнение стандартов по методам тестирования воздушных фильтров

Стандарт	ГОСТ Р EN 779:2014	ГОСТ Р 58499-2019	ГОСТ Р 70061-2022
Значения расхода воздуха при тестировании	От 0.24 м ³ /с (850 м ³ /ч) до 1.5 м ³ /с (5400 м ³ /ч).	От 0.25 м ³ /с (900 м ³ /ч) до 1.67 м ³ /с (6000 м ³ /ч).	От 0.25 м ³ /с (900 м ³ /ч) и 1.5 м ³ /с (5400 м ³ /ч).
Методика тестирования	Тестирование эффективности для частиц 0.4 мкм.	Тестирование эффективности для частиц 0.3-3.0 мкм	Тестирование эффективности для частиц 0.3-10 мкм.
Методика кондиционирования (разряжения)	Разряжение фильтровального материала с помощью изопропанола. Строгая методика.	Разряжение фильтровального материала с помощью паров изопропанола. Строгая методика.	Разряжение целого фильтра с помощью паров изопропанола. Строгая методика.
Методика нагрузки пылью	Нагрузка пылью ASHRAE. Грубая пыль.	Нагрузка пылью ISO. Мелкая пыль.	Нагрузка пылью ISO. Мелкая пыль.
Методика гравиметрической эффективности	Нет	Да	Да, при необходимости
Классификации	По классам очистки G, M и F.	Нет	По PM1, PM2.5 и PM 10.
Конечный перепад давления	Классы: G = 250 Па, M и F = 450 Па.	НЭ* <35% = 375 Па НЭ* >35% = 625 Па	ePM10<50% =200 Па ePM10≥ 50% =300 Па

*НЭ-начальная эффективность

Важным параметром, с точки зрения эксплуатации комплексных воздухоочистительных устройств (КВОУ) энергетических ГТУ, является конечный (предельно-допустимый) перепад давления на фильтрах. В ГОСТ Р 58499-2019 (ISO 29461-1:2013), стандарте ISO 16890 (ГОСТ Р 70061-2022) и ГОСТ Р EN 779-2014 эти значения сильно различаются.

Ряд производителей воздушных фильтров класса F (ГОСТ Р EN 779:2014) уже начали увеличивать этот показатель до величин 600 Па, а класса G до 450 Па с целью, таким образом, увеличить жизненный цикл своей продукции. Тогда для трехступенчатой системы очистки циклового воздуха ГТУ в КВОУ конечный перепад давления может составить величину 1500 Па (450+450+600), не считая перепада давления на противомоскитных

сетках, глушителях шума. Достижение такой величины перепада давления на фильтрах КВОУ в процессе эксплуатации неминуемо приведет к аварийной остановке ГТУ. К аналогичным последствиям приведет использование и ГОСТ Р 58499-2019: $(375+625+625) = 1625$ Па.

Ранее нами уже отмечалось, что данный стандарт не дает классификации фильтров, а только рекомендует методики их проверки. В связи с этим возникла неоднозначная ситуация – стандарт для воздушных фильтров, предназначенных для использования в роторных машинах, включая стационарные газотурбинные установки создан, но он никак не классифицирует эти фильтры. Также не понятна взаимосвязь результатов тестирования фильтров, осуществленных по этому стандарту с классификацией тех же самых фильтр - элементов, выполненной по другим действующим стандартам. И, вот наконец после семи лет выхода в свет стандарта ISO 29461:2013, ситуация начала меняться. В центральном секретариате Международной организации по сертификации (ISO/CS) 20 августа 2020 под номером № 0716 был зарегистрирован проект новой версии стандарта ISO 29461-1 (только для ознакомления), который находился на стадии дискуссии до 2021 года [24]. В 2021 этот стандарт был получил официальный статус: ISO 29461-1 (second edition 2017-09) «High efficiency filters and filter media for removing particles from air -Part 1: Classification, performance, testing and marking» [25]. В нем изложены методы испытаний- Обзор общих требований и процедур испытаний, а также оценка фильтра, документация. В табл.1.13 представлена классификации одних и тех же фильтров с действующими европейскими стандартами ISO 29461, ISO 29463 и ISO 16890.

Табл. 1.13 . Классификация фильтров

Класс	Группа	ISO 29463	ISO 16890			Нач. гравиметрическая задерживаемость A100
		MPPS efficiency	ePM _{1, min}	ePM _{2,5, min}	ePM ₁₀	
ISO T1	Грубой очистки					20% < A ₁₀₀ < 50%
ISO T2						≥ 50%
ISO T3						≥ 70%
ISO T4						≥ 85%
ISO T5	ePM ₁₀				≥ 50%	
ISO T6	ePM _{2,5}			≥ 50%		
ISO T7	ePM ₁		≥ 50%			
ISO T8			≥ 70%			
ISO T9			≥ 85%			
ISO T10	EPA	≥ 85%				
ISO T11		≥ 95%				
ISO T12		≥ 99,5%				
ISO T13	HEPA	≥ 99,95%				

Фильтры, предназначенные для применения в роторных машинах, следует обозначать литером «Т» (Турбомашины). Европейский рынок получил понятный нормативный документ, позволяющий ориентироваться в хитросплетениях классификации фильтров различного назначения, выполненных согласно методик тестирования, сразу нескольких Европейских стандартов.

Система классификации, показанная в таблице 1.13, разделяет фильтры на группы и классы в соответствии с их минимальной эффективностью.

- Классы Т1-Т4 тестируются по ISO 16890, пылезадерживающая способность определяется для первых 100 г пыли.
- Класс Т5 тестируется по ISO 16890.
- Классы Т6-Т9 тестируются по ISO 16890, в расчет берется только минимальная эффективность
- Классы Т10-Т13 тестируются по ISO 29463.

В 2022 году вступила в силу вторая часть этого стандарта ISO 29461-2 (First edition 2022-08) «Air intake filter systems for rotary machinery - Test methods - Part 2: Filter element endurance test in fog and mist environments» (Системы фильтров для забора воздуха для роторных машин — Методы испытаний — Часть 2: Тестирование фильтров на износоустойчивость в условиях тумана и повышенной влажности воздуха) [26].

Серия стандартов ISO 29461 предоставляет возможность сравнивать данные продукты аналогичным методом и определить, какие критерии важны для систем воздухозаборных фильтров для обеспечения производительности роторных машин. Цель состоит в том, чтобы сравнить эффективность различных фильтров и типов фильтров в зависимости от условий эксплуатации, в которых они, в конечном итоге, будут использоваться.

Система воздушной фильтрации роторных машин является важной частью всей системы ГТУ и воздушных компрессоров. Обычно она состоит из фильтрующих элементов с соответствующим способом установки. Условия эксплуатации роторных машин, включая ГТУ и компрессоры, а также их воздухозаборные фильтрующие установки, сложны и вызывают множество трудностей. Воздушные фильтры задерживают водяной туман и капли, когда воздух проходит через блок воздушного фильтра, в случае, если оборудование работает в дождливой, туманной, дымчатой или другой среде с высокой влажностью или в местной производственной среде, содержащей большое количество водяного пара, например, рядом с градирней. Если задерживается избыточное количество воды, то это

может значительно повлиять на эффективность фильтров; перепад давления быстро возрастает, что в критических случаях приводит к останову.

Надежность и бесперебойная работа роторного оборудования считаются главным приоритетом для конечных потребителей, при этом быстро растущий перепад давления в условиях высокой влажности обычно является их главной заботой. По всему миру происходят аварийные случаи при эксплуатации роторных машин, вызванные условиями высокой влажности, будь то на суше, вдоль реки или побережья.

Чтобы соответствовать требованиям производства и эксплуатации, необходимо учитывать водостойкость элементов воздушных фильтров, помимо оценки характеристик начального перепада давления, эффективности фильтрации и пылезадерживающей способности, особенно когда элементы воздушного фильтра используются в условиях высокой влажности или всасываемый воздух содержит большое количество капель жидкости.

Стандарт ISO 29461-2 содержит метод испытания фильтрующих элементов на водостойкость и может быть использован для оценки тенденций изменения характеристик фильтрующих элементов при контакте с водой и туманом. Этот документ может быть использован для:

- разработки продуктов для производителей фильтров;
- выбора поставщика для конечных потребителей;
- производителей водостойких сред на стадии разработки.

Этот документ предоставляет экономичный и простой в проведении метод испытаний, который применим к фильтрующим элементам импульсной очистки и фильтрующим элементам общей вентиляции.

Следует отметить, что ни первая, ни вторая часть стандарта ISO 29461 на данный момент не вступила в силу в нашей стране, но это не исключает право отечественных пользователей этой продукции запрашивать западных производителей воздушных фильтров для роторных установок соответствующих тестов испытаний по оценке водостойкости фильтр-элементов в лабораторных условиях.

В последующем планируется ввести в действие следующие части стандарта ISO 29461:

- испытание на разрыв фильтра для определения структурного ущерба в сравнении со снижением эффективности;
- тестирование солевыми брызгами (морские испытания) для измерения роста перепада давления при постоянном расходе соляного спрея.

В 2019 году, основываясь на многолетнем опыте эксплуатации и результатах многочисленных исследований, выполненных по определению водостойкости воздушных фильтров, применяемых для энергетических ГТУ, мы выступили с предложением «О необходимости включения требования по определению водостойкости воздушных фильтров в стандарт» [27]. В этой работе был предложен метод расчета количества воды, подаваемой на испытуемый фильтр, исходя из конкретных климатических условий, в которых он будет использоваться. Это основополагающее отличие от вступившего в силу европейского стандарта ISO 29461-2, который предлагает тестировать воздушные фильтры для любого региона мира при одинаковых лабораторных условиях.

Но, поскольку большинство действующих ГОСТ, касающихся воздухоочистки являются результатом технического перевода западных (европейских) стандартов, наш призыв не был услышан и приоритет в вопросе определения водостойкости фильтров перешел к европейцам.

«Нет пророка в своем отечестве» (Евангеле от Матвея гл.13. ст.57).

Почему же так важно тестировать воздушные фильтры на водостойкость? В процессе многолетней эксплуатации воздушных фильтров ГТУ в прибрежных (onshore) и морских (offshore) условиях, а также в странах с тропическим климатом было замечено, что эффективность фильтр элементов с ростом влажности уменьшается. На рис.1.22 схематично показано, как влажность окружающей среды (голубая стрелка) влияет на класс очистки (эффективность) воздушных фильтров [28].

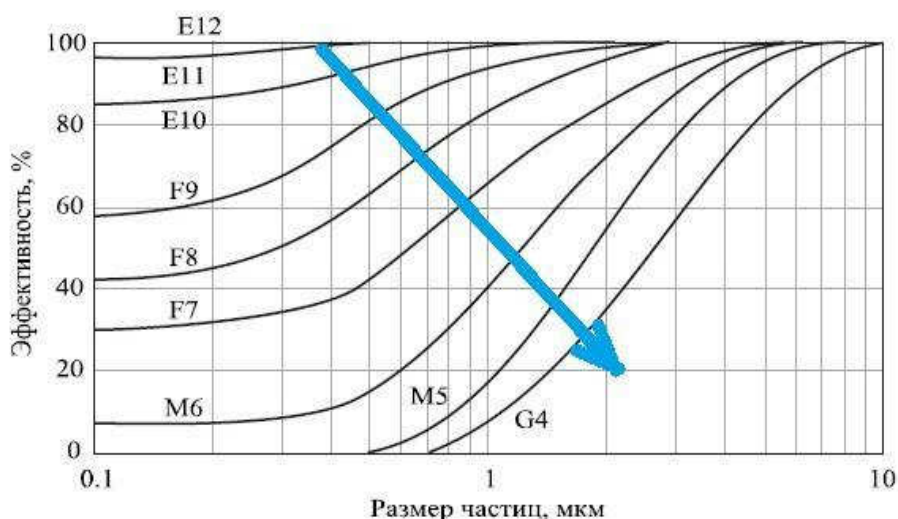


Рис.1.22. Влияние влажности окружающей среды (голубая стрелка) на класс очистки (эффективность) воздушных фильтров

При намокании фильтровального материала его эффективность по улавливанию частиц пыли резко снижается и становится соизмеримой с эффективностью фильтра с более низким классом очистки.

Резюме:

Существующие стандарты не дают ответа на вопрос, как будут вести себя воздушные фильтры не в лабораторных, а в реальных условиях эксплуатации. Неслучайно во всех стандартах приводится широко известная фраза: «полученные в соответствии с требованиями настоящего стандарта результаты не могут применяться для прогнозирования эффективности при эксплуатации и срока службы фильтра».

Появление стандарта ISO 29461 не изменило это положение в вопросе оценки водостойкости воздушных фильтров в лабораторных условиях. Во второй части стандарта говорится, что результаты эксплуатационных характеристик, полученные в соответствии с этим документом, не могут быть количественно применены (сами по себе) для прогнозирования эксплуатационных характеристик в отношении водостойкости и срока службы воздушных фильтров.

Все существующие стандарты были разработаны для других областей применения, условия работы в которых не соответствуют условиям работы ГТУ. Также не существовало четкой корреляции между стандартами. Новый стандарт ISO 29461-1 разработан специально для выбора фильтров для турбокомпрессорного оборудования. Он заменяет четыре этих стандарта и является таким образом первой системой классификации, которая используется для всего диапазона эффективностей фильтров, что лучше отражает их работу в реальных условиях.

Уважаемый читатель!

Мы хотели бы в очередной раз обратить ваше внимание на тот факт, что уже 4 года назад в нашей стране вступил в силу ГОСТ Р 58499-2019 (ИСО 29461-1:2013) «Системы очистки воздуха, подаваемого в роторные установки. Методы испытаний. Часть 1. Статические фильтрующие элементы». Несмотря на это, в технических заданиях и тендерных процедурах на закупку воздушных фильтров для КВОУ энергетических ГТУ фигурирует ГОСТ Р ЕН 779-2014 «Фильтры общего назначения. Определение технических характеристик».

Просим задуматься: правомерно ли это?

Зададимся вопросом: почему на энергетических объектах до настоящего времени используются воздушные фильтры для общей вентиляции? Разве технические требования, предъявляемые к таким фильтрам сопоставимы с требованиями к энергетическому оборудованию, используемому на стратегических объектах, как электростанции? Что произойдет с вентиляционным оборудованием, если воздушный фильтр, установленный в вентиляционном канале, разрушится? В худшем случае нас ждет остановка (поломка) вентилятора или кондиционера. Это в худшем случае.

Ну, а к чему приведет попадание посторонних предметов в проточную часть работающей ГТУ, объяснять не надо.

Налицо несопоставимый уровень материального ущерба и последствий от разрушения воздушных фильтров, установленных в вентиляционных системах и КВОУ энергетических ГТУ.

Теперь, когда мы научились летать по воздуху, как птицы, плавать под водой, как рыбы

Нам не хватает одного: научиться жить на земле, как люди

Конфуций

Глава 2. Источники загрязнений окружающей среды

Авторы многочисленных публикаций и выступлений, посвященных загрязнению окружающей среды, приводят различную классификацию источников загрязнений и их количественные показатели. Порой приведенные в этих публикациях данные существенно разнятся, поэтому обратимся к экспертному мнению академика РАН, д.т.н. Клименко А.В. [1].

Во многих случаях хозяйственная деятельность человека приводит к эмиссии в атмосферу газов, вызывающих парниковый эффект. К числу таких газов относятся диоксид углерода, метан, закись азота и др. Примерный расклад различных отраслей приведен в табл.2.1.

Табл.2.1. Главные источники антропогенного поступления парниковых газов в атмосферу [1]

Виды хозяйственной деятельности	Парниковый газ	Примерная доля в парниковом эффекте, %
Энергетика, использующая ископаемое органическое топливо	Диоксид углерода	41
Промышленность (металлургия, производство строительных материалов, химия и др.)	Диоксид углерода	22
Сельское хозяйство	Метан, закись азота	8
Добыча и транспортировка газа	Метан	4
Транспорт	Диоксид углерода	16

Энергетика, использующая ископаемое органическое топливо, играет наиболее значимую роль в развитии парникового эффекта, а главным парниковым газом оказывается диоксид углерода, суммарный вклад которого составляет не менее 70% от общего эффекта. Используемые виды ископаемого топлива органического происхождения содержат большое количество углерода на единицу массы и поэтому приводят к образованию значительного количества диоксида углерода.

Более 60% совокупного объема производства электрической энергии в Российской Федерации сосредоточено на тепловых электрических станциях (ТЭС), сжигающих ископаемое топливо. Объем электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, составляет около 20%, на ГЭС- 19% (Рис.2.1).



Рис.2.1. Дым и пар из дымовых труб и башенных градирен (<https://clck.ru/33YHJE>)

Производство тепловой энергии в Российской Федерации за счет сжигания ископаемого топлива осуществляется на тепловых электростанциях с комбинированной выработкой электрической энергии и тепла, а также в котельных в соотношении 40 на 60%. Примерно половина произведенной тепловой энергии потребляется промышленностью для технологических нужд, другая половина расходуется на нужды отопления и горячего водоснабжения потребителей. Промышленное потребление тепловой энергии сосредоточено в основном в химической, нефтехимической, топливной, машиностроительной, обрабатывающей и пищевой промышленности.

Главной антропогенной причиной увеличения концентрации парниковых газов и самого парникового эффекта считается сжигание ископаемого органического топлива. Структура потребления энергии в процентном отношении в России в 2020 году приведена в табл.2.2.

Табл.2.2. Структура потребления энергии в России в 2020 [1]

Энергетический ресурс	%
Нефть	22,6
Уголь	11,5
Природный газ	52,3
Ядерная энергетика	6,8
Гидроэнергетика	6,7
Возобновляемые источники	0,1

В 2021 году был представлен очередной оценочный доклад Межправительственной группы экспертов ООН по изменению климата IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Важнейший вывод, который в нем был сделан: потепление — свершившийся факт и человечество будет жить в условиях потепления климата до конца нынешнего столетия и даже за его пределами.

Распределение потепления по поверхности планеты весьма неоднородно. Особое значение изменение климата имеет для территории России. Процесс потепления в Северном полушарии, как правило, более интенсивно проявляется в высоких широтах. Именно поэтому территория России находится в эпицентре происходящих изменений. Насколько они существенны, можно видеть на рис.2.2, где представлены данные об изменении средней температуры за последние 170 лет в мире, на территории России и в Москве [1].

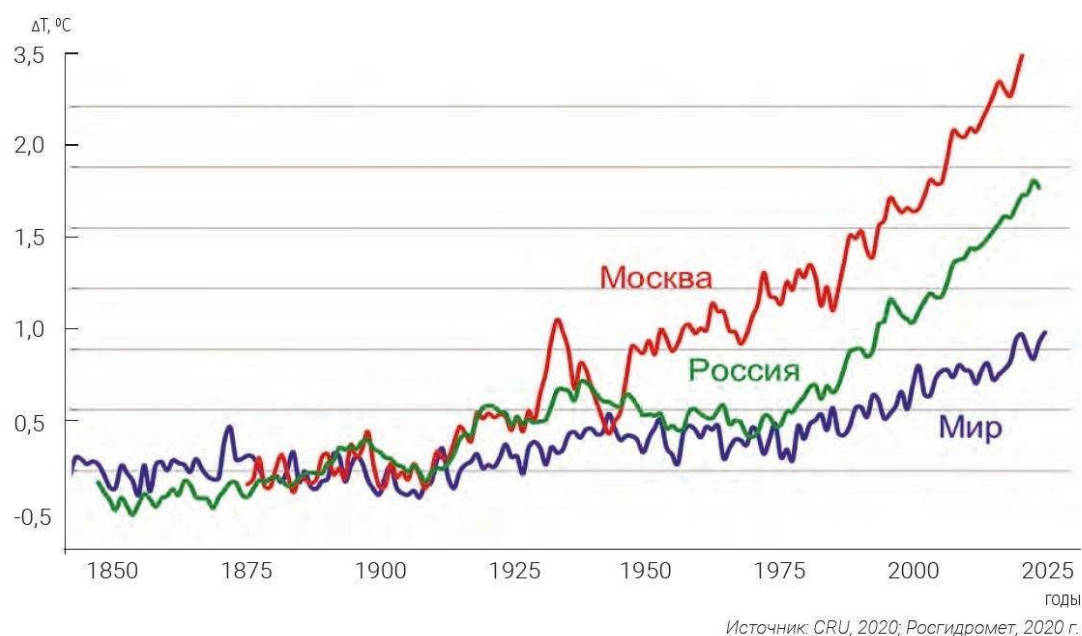


Рис.2.2. Рост среднегодовой температуры в Москве, на территории России и в среднем по миру

Вызовы, формируемые текущими трендами климатической политики в мире и нашей стране, диктуют необходимость дальнейшего развития стратегий и мер по снижению не только выбросов парниковых газов, но и других загрязняющих веществ.

Постановлением Правительства Российской Федерации № 2055 от 09.12.2020 утверждено «Положение о предельно допустимых выбросах, временно разрешенных выбросах, предельно допустимых нормах вредных физических воздействий на атмосферный воздух и разрешениях на выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух». В целях данного Положения под предельно допустимыми выбросами понимается

предельно допустимые выбросы, используемые в Федеральном законе «Об охране атмосферного воздуха», а также нормативы допустимых выбросов, указанные в Федеральном законе «Об охране окружающей среды».

Из сказанного следует, что источники загрязнения атмосферного воздуха и окружающей среды делятся на две большие группы: природные (климатические) и рукотворные, т.е. созданные в результате хозяйственной деятельности человека. Эти две группы взаимосвязаны между собой и оказывают глобальное влияние друг на друга.

Евва Filter

2.1. Природные источники загрязнений

2.1.1. Вулканы, песчаные и пыльные бури. Рассмотрим некоторые из них, которые оказывают наибольшее влияние на жизнедеятельность людей и работу энергетического оборудования. Широко известными источниками и, оказывающим значительное влияние на загрязнение окружающей среды, являются **вулканы**. На Земле существует порядка 1 500 активных вулканов, 50 из них ежегодно извергаются, выбрасывая в воздух пар, пепел, ядовитые газы и лаву [2]. Так недавно на японском острове Кюсю произошло извержение вулкана Сакурадзима, дым поднялся на высоту один километр. Об этом сообщило Национальное метеорологическое управление Японии. Ранее вулкан Чикучаки на курильском острове Парамушир в Сахалинской области выбросил пепел на высоту до четырёх километров. Шлейф пепла протянулся примерно на 70 километров к востоку от вулкана [3]. На рис.2.3 изображено извержение вулкана Шивелуч на Камчатке.

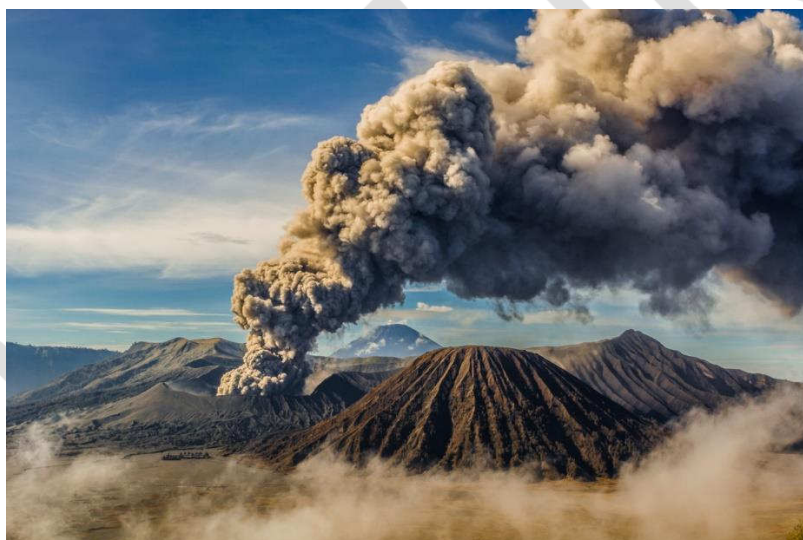


Рис.2.3. Извержение камчатского вулкана Шивелуч (<https://clck.ru/33VHz>)

Не менее существенное влияние по интенсивности загрязнения окружающей среды оказывают **песчаные и пыльные бури**. В результате чего в воздух поднимаются огромные массы песка и пыли, покрывающие толстым слоем отложений все вокруг.

В нашей стране территория, занятая пустынными территориями чрезвычайно мала, но несмотря на это, изредка отмечаются случаи, когда песчаные бури накрывают и наши города, расположенные вне пустынных территорий. Так 16 мая 2019 года небо над городом Благовещенск стало желтым, на улицах резко потемнело, усилился ветер. Метеорологи проинформировали население о песчаной буре, которая бушует на территории северного Китая и Монголии. Циклон перенес часть природной стихии в Приамурье, в результате

которого тонны песка, поднятые ветром из пустыни Гоби, частично достигли Благовещенска и накрыли город (Рис.2.4а) [4]. В сентябре 2020 году пыльная буря накрыла город Ростов–на-Дону. Как было установлено учеными в результате выполненных сравнительных анализов, пыль была перенесена сильными восточными ветрами из степных районов Калмыкии, Астраханской области, Ставропольского края и северной части Дагестана (Рис.2.4б) [5].



Рис.2.4. Бури в городах: а- песчаная в Благовещенске; б- пыльная в Ростове-на- Дону (<https://clck.ru/33VKpr>)

2.1.2. Пожар - неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства [6]. На рис.2.5. представлено фото пожара торфяных болот в Московской области летом 2010 года.



Рис.2.5. Пожар торфяных болот в Московской области 2010 год (<https://clck.ru/33RwKt>)

Остановимся на этой теме более подробно, поскольку это событие оказало существенное влияние, как на людей, проживающих в Москве и Московской области, так и энергетические объекты столицы нашей страны.

В конце августа и начале сентября 2010 г. на всей территории России, сначала в Центральном федеральном округе, а затем и в других регионах, возникла сложная пожарная обстановка вследствие аномальной жары и отсутствия осадков. По состоянию на начало августа 2010 г. пожарами было охвачено около 200 тыс. га в 20 регионах России. Экономический ущерб от этих пожаров оценивался в сумме более 450 млрд руб.

По своему размаху, продолжительности и по степени последствий жара не имела аналогов за более чем вековую историю наблюдений погоды. Глава Росгидромета заявил, что такого жаркого лета в России не было со времен Рюрика, т.е. за последние более чем 1000 лет. По оценке главы Гидрометцентра, подобной жары, возможно, не случалось 5000 лет.

Причиной аномально высокой температуры воздуха, установившейся на столь длительный срок, являлся так называемый “блокирующий антициклон” – обширный малоподвижный длительно существующий антициклон, который не пропускал другие воздушные массы на занимаемую им территорию.

Необычно длительный срок существования этого антициклона, который продержался более двух месяцев, а также преобладание юго-восточного ветра привели к длительному разогреву воздуха до рекордных температур, особенно на Европейской части территории России. Метеостанция “Балчуг” Москвы 29 июля зафиксировала максимальную температуру атмосферного воздуха, равную +39°C.

Продолжительный период аномально жаркой погоды в России стал одной из причин массовых пожаров, сопровождавшихся небывалым смогом в некоторых городах и регионах. Лесные и торфяные пожары в Подмоскovie сопровождались запахом гари и сильным задымлением в Москве.

С начала августа 2010 г. в Москве сложилась чрезвычайная экологическая ситуация – в городе наблюдался сильнейший смог, разовые концентрации загрязняющих веществ превышали предельно допустимые концентрации (ПДК) в несколько раз: по угарному газу – почти до 7 раз, по взвешенным веществам – до 16 раз, по диоксиду азота – более, чем в 2 раза [7-10].

10 августа управление ЗАГС г. Москвы сообщило о том, что уровень смертности в Москве за месяц повысился в 1.5 раза. Отмечалась массовая гибель диких животных в московских парках и подмосковных лесах. Смог проник в метро, нарушил работу московских аэропортов, было запрещено движение судов по каналу имени Москвы,

возникли проблемы в работе оборудования ТЭЦ.

В таблице 2.3 приведены результаты замеров, выполненные 10 и 12 августа 2010 г. на Звездном бульваре в Останкинском районе г. Москвы [11].

Таблица 2.3. Количество взвешенных частиц в атмосферном воздухе в Москве в августе 2010 г

Размер частиц, мкм	Количество частиц, млн/м ³	
	10.08.2010	12.08.2010
0.3–0.5	742 001 024	249 456 816
0.5–1.0	126 881 716	32 140 306
1.0–3.0	5 633 916	1 526 576
3.0–5.0	503 097	185 976
5.0–10.0	163 753	56 417
Более 10.0	18 307	7794
Всего	875 201 813	283 373 885

Анализ данных, приведенных в табл. 2.3, показывает, что количество мелкодисперсных частиц (0.3–0.5 мкм) 10 августа возросло в 17 раз, 12 августа – в 6 раз по сравнению с периодом до возникновения пожаров (43 003 736 млн/м³). Содержание этих частиц составляло 84.8 и 88.0% соответственно.

На рисунке 2.6 представлена фотография смога в Москве днем 3 августа 2010 г. в районе ТЭЦ ОАО “Мосэнерго” на Бережковской набережной рядом с ТЭЦ.



Рис.2.6. Смог на Бережковской набережной, Москва, 3 августа 2010 г (<https://clck.ru/33W4ZU>)

7 августа 2010 г. на ТЭЦ в Северном административном округе (САО) Москвы и ТЭЦ в Московской области (МО) резко вырос перепад давления на фильтрах КВОУ ГТУ из-за большого количества частиц, содержащихся в атмосферном воздухе. Скорость загрязнения фильтров была такой высокой, что предельные перепады давления на фильтрах КВОУ достигались в течение нескольких часов работы ГТУ (Рис. 2.7) [11].

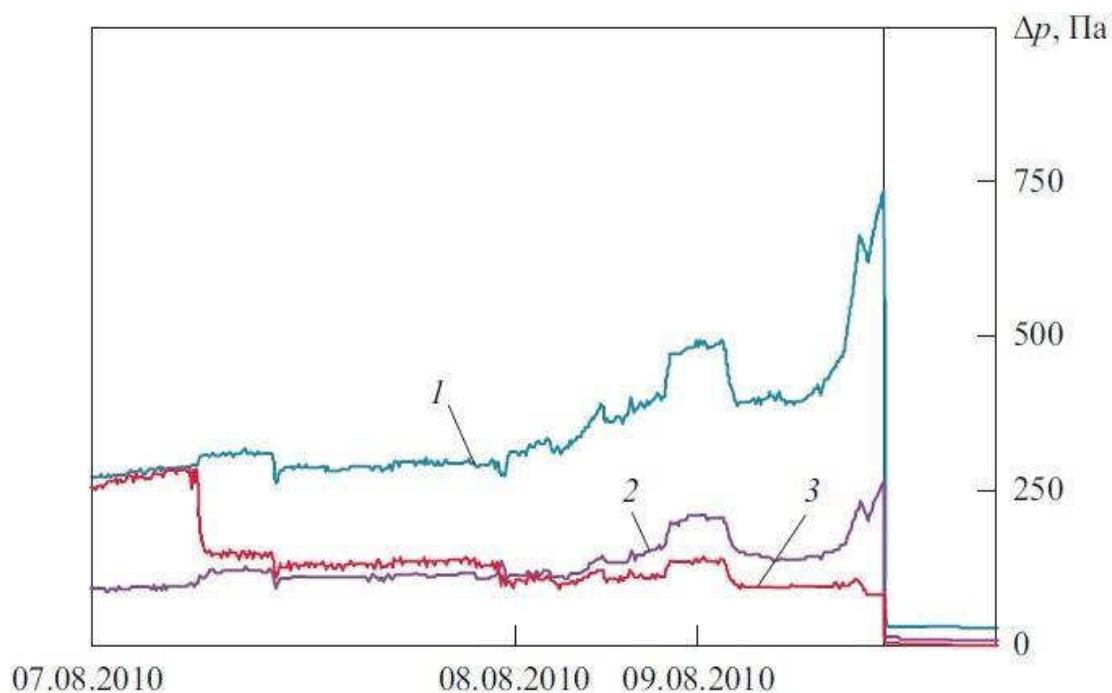


Рис. 2.7. Тренды перепадов давления на фильтрах КВОУ ГТУ 7 августа 2010 г.

1 – фильтры тонкой очистки; 2- фильтры грубой очистки; 3-коагуляторы

Наибольший рост перепада давления наблюдался на фильтрах тонкой очистки, замена которых при работающих ГТУ не предусмотрена. Высокая загрязненность атмосферного воздуха приводила к аварийным остановам ГТУ, снижению диспетчерского графика электрической нагрузки и существенным экономическим потерям. Замена фильтров в КВОУ осуществлялась при остановленных ГТУ.

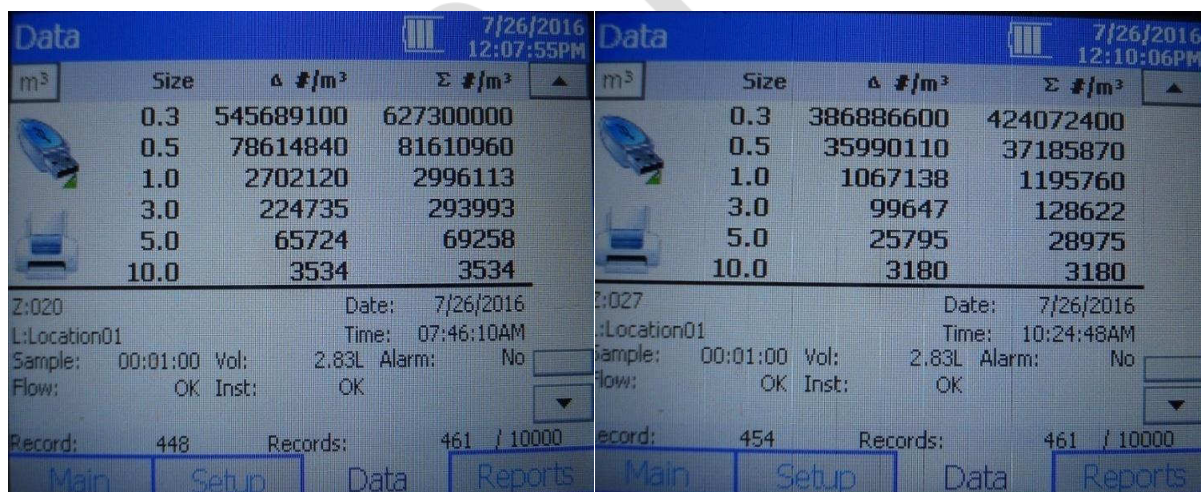
На ТЭС «Международная» в связи с высокой запыленностью атмосферного воздуха и резким ростом перепадов давления на фильтрах КВОУ пришлось принудительно останавливать ГТУ Siemens SGT-800 (две из четырех) для замены фильтров, остальные двигатели были переведены на пониженные режимы работы. В результате был значительно снижен диспетчерский график электрической нагрузки. Кроме того, остро встал вопрос наличия запасных комплектов фильтров для КВОУ, поскольку замена фильтров была произведена несколько раз.

18 августа 2010 г. смог окончательно покинул Москву.

Во второй половине июля 2016 года в Красноярском крае из-за аномальной жары и отсутствия осадков возникла сложная пожарная и экологическая обстановка. Пожары, охватившие большую площадь лесов Восточно - Сибирского экономического района, сопровождались сильным смогом, накрывшим Красноярск.

С 22 июля до 25 июля 2016 года в Красноярске сохранялись неблагоприятные метеорологические условия, связанные с задымлением атмосферы города. Для снижения антропогенной нагрузки был введен режим неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) первой степени опасности. При объявлении режима “черного неба” промышленные предприятия должны обеспечивать снижение выбросов вредных веществ в атмосферный воздух в соответствии с объявленным НМУ.

26 июля 2016 года небо над Москвой накрыла мгла. По сообщению главы Гидрометцентра, сделанному по Центральному телевидению, взвешенные частицы от лесных пожаров в Красноярском крае достигли пределов Москвы и Московской области. Для справки следует отметить, что расстояние между Красноярском и Москвой – 3352 км по прямой. В отличие от торфяных и лесных пожаров в Московской области 2010 года, смог этого года не сопровождался запахом гари, поэтому остался незамеченным большинством москвичей. Однако на энергетических объектах Москвы это природное явление оставило заметный след (Рис. 2.8) [11].



а

б

Рис. 2.8. Количество взвешенных частиц в 1 м³ атмосферного воздуха 26.07.2016 года: а- на всасе КВОУ ТЭЦ в Юго-Западном административном округе (ЮЗАО); б –ТЭЦ в МО

26 июля 2016 года на ТЭЦ в ЮЗАО и в МО результате выполненных замеров были зафиксированы повышенные концентрации взвешенных частиц на всасах КВОУ. Расстояние между ТЭЦ в ЮЗАО и ТЭЦ, расположенной в МО, составляет 26 км по прямой. Эта незначительная разница в местонахождении ТЭЦ оказала существенное влияние на

загрязненность атмосферного воздуха в этих местах. Общее количество взвешенных частиц в атмосферном воздухе на всасе КВОУ ТЭЦ в ЮЗАО оказалось на 203 млн/м^3 больше, чем на ТЭЦ в МО. Исходя из этого, можно сделать заключение, что Московская область в меньшей степени подверглась загрязнению, чем Москва.

Распределение дисперсности взвешенных частиц в атмосферном воздухе на всасах КВОУ этих ТЭЦ представлены на Рисунке 2.9 [11].

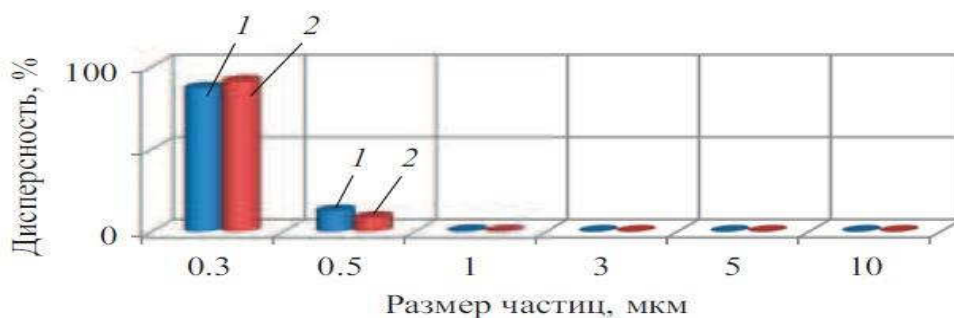


Рис.2.9. Распределение дисперсности взвешенных частиц атмосферного воздуха на всасе КВОУ ТЭЦ в ЮЗАО (1) и ТЭЦ в МО (2) 26 июля 2016 года.

Анализируя полученные результаты, приходим к выводу, что количество мелкодисперсных частиц (0.3–0.5 мкм) на ТЭЦ в Подмосковье на 4.2% больше, чем на ТЭЦ в Москве. С другой стороны, количество частиц размером 0.5–1.0 мкм в ЮЗАО на 4% превышает их количество в МО. Другими словами, в атмосферном воздухе двух ТЭЦ произошло перераспределение количества взвешенных частиц между их размерами.

Сравнивая эти данные со значениями, представленными в таблице 4.2, приходим к заключению, что дисперсность частиц в атмосферном воздухе ТЭЦ-20 в июле 2016 г. практически полностью совпадает с результатами замеров 12 августа 2010 г.

С 26 по 29 июля 2016 года общий перепад давления на КВОУ ТЭЦ в ЮЗАО увеличился на 50 Па, на ТЭЦ в Подмосковье – на 45 Па. Как известно, увеличение перепада давления в КВОУ на 50 Па приводит к снижению выработки электроэнергии ГТУ в среднем на 0.1%. Согласно ГОСТ Р ЕН 779:2014 предельно допустимый перепад давления на фильтрах грубой очистки составляет 250 Па (такие фильтры обычно устанавливают на первые ступени системы фильтрации КВОУ).

За четыре дня эксплуатации в данных климатических условиях 20% срока службы этих фильтров были израсходованы. Для фильтров тонкой очистки предельно допустимый перепад давления равен 450 Па. При годовом жизненном цикле четыре дня работы таких фильтров при повышенной запыленности атмосферного воздуха эквивалентны 40 дням эксплуатации в нормальных условиях.

Ввиду незначительной скорости ветра над Москвой в конце июля 2016 года смог от красноярских пожаров медленно покидал столицу, постепенно снижая уровень загрязнения атмосферного воздуха. 28 июля 2016 года на московских ТЭЦ в Южном административном округе (ЮАО) и ТЭЦ в Западном административном округе (ЗАО) были зафиксированы концентрации взвешенных частиц вдвое меньше, чем двумя днями ранее на ТЭЦ в ЮЗАО (Рис.2.10) [11]. Расстояние между ТЭЦ в ЮАО и ТЭЦ в ЗАО по прямой (по воздуху), составляет всего 7 км, поэтому разница в общем количестве взвешенных частиц в атмосферном воздухе ТЭЦ не отличалась более, чем на 8.5%.



а

б

Рис. 2.10. Количество взвешенных частиц в 1 м³ атмосферного воздуха на всасе КВОУ ТЭЦ в ЮАО (а), ТЭЦ в ЗАО (б)

На Рисунке 2.11 представлено распределение дисперсности взвешенных частиц в атмосферном воздухе этих ТЭЦ [11].

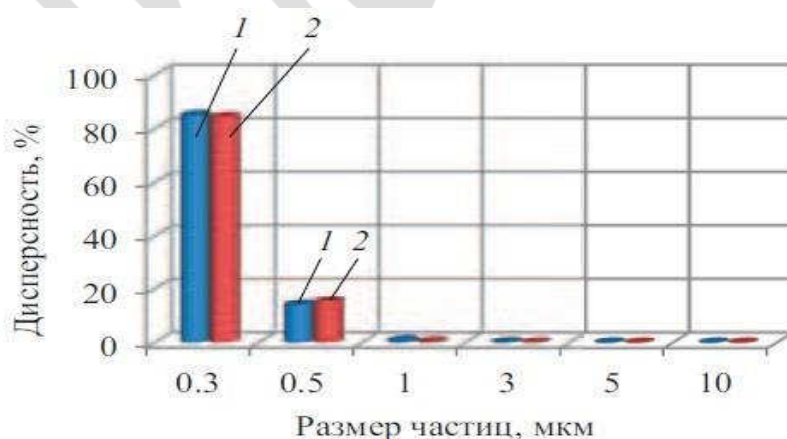


Рис.2.11. Распределение дисперсности взвешенных частиц атмосферного воздуха на всасе КВОУ ТЭЦ в ЮАО (1) и ТЭЦ в ЗАО (2) 28 июля 2016 года

Очевидна практически полная идентичность дисперсности взвешенных частиц в атмосфере обеих ТЭЦ. Сравнивая эти данные со значениями аналогичных величин в Таблице 4.2, приходим к выводу, что дисперсность частиц в атмосферном воздухе ТЭЦ в

ЮАО и ТЭЦ в ЗАО 28 июля 2016 года практически полностью совпадает с результатами замеров 10 августа 2010 года.

Во время нахождения над Москвой смога от пожаров в Красноярском крае были выполнены замеры на всех ТЭЦ с ПГУ, находящихся в действии. На рис. 2.12 приведены графики количества взвешенных частиц в атмосферном воздухе, зафиксированные на всах КВОУ ГТУ в период 26–29 июля 2016 года, в сравнении со среднемесячными значениями июня и августа этого года [11].

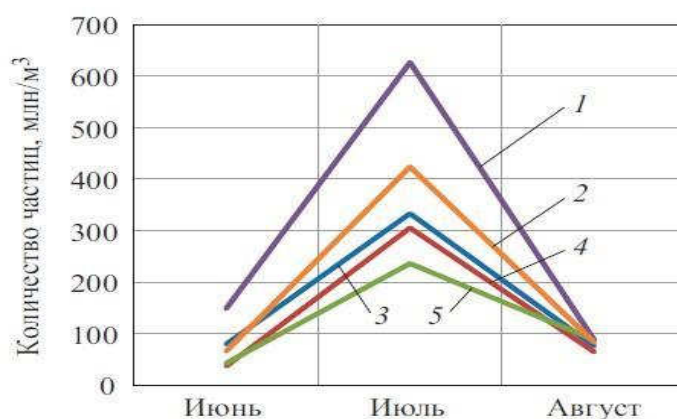


Рис.2.12. Количество взвешенных частиц на всах КВОУ ТЭЦ: 1-ТЭЦ в ЮЗАО; 2- ТЭЦ в МО; 3-ТЭЦ в ЮАО; 4-ТЭЦ в ЗАО; 5-ТЭЦ в Северо-Западном административном округе (СЗАО)

Как видно из представленных графических зависимостей, налицо ярко выраженные экстремумы количества взвешенных частиц на всах КВОУ всех ТЭЦ в конце июля. По мере ухода смога из региона Москвы экстремумы снижались. Превышение концентрации взвешенных частиц в этот период времени над среднемесячными значениями в июне и августе 2016 года представлено в Таблице 2.4.

Табл. 2.4. Превышение концентрации взвешенных частиц в 1 м^3 атмосферного воздуха 26–29 июля 2016 г. над средними значениями в июне и августе 2016 года

Расположение ТЭЦ	Превышение, раз	
	Июнь	Август
ЮАО	4.2	4.4
ЗАО	8.5	4.8
СЗАО	5.6	2.7
ЮЗАО	4.2	7.2
МО	6.5	5.1

На Рис.2.13 приведены графики распределения мелкодисперсных частиц (0.3–0.5 мкм)

взвешенных частиц в атмосферном воздухе, зафиксированные на всах КВОУ ГТУ в период 26-29 июля 2016 года, в сравнении со среднемесячными значениями июня и августа этого года. В отличие от зависимостей, приведенных на Рис.2.12, в данном случае имеем минимум функции двух переменных в июле месяце. Наибольшее содержание мелкодисперсных частиц зафиксировано на ТЭЦ в МО, наименьшее – на ТЭЦ в ЗАО [11].

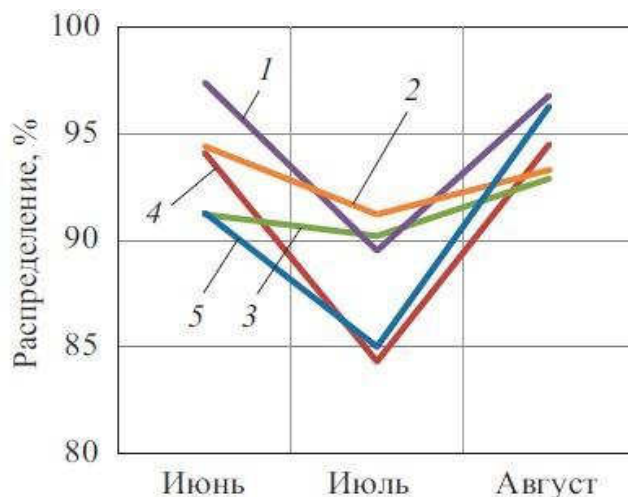


Рис. 2.13. Сравнение ТЭЦ с ГТУ по распределению мелкодисперсных частиц (0.3–0.5 мкм) в м^3 атмосферного воздуха на всах КВОУ: 1 – ТЭЦ в ЮЗАО; 2 – ТЭЦ в МО; 3 – ТЭЦ СЗАО; 4 – ТЭЦ в ЗАО; 5 – ТЭЦ в ЮАО.

Графические зависимости, представленные на Рисунках 2.11 и 2.12, имеют зеркальное отражение. Таким образом, налицо ярко выраженная обратная зависимость количества взвешенных частиц и частиц мелкодисперсного состава в атмосферном воздухе во время лесных пожаров.

Опыт эксплуатации ТЭЦ с ПГУ во время пожаров в Москве и Красноярске в 2010 и 2016 годах показал:

1. Вне зависимости от расстояния очагов пожаров до ГТУ загрязнение воздуха, вызванное этими природными явлениями, оказывает существенное влияние на технические и экономические показатели работы электростанций.
2. Несмотря на различие в количестве взвешенных частиц в атмосферном воздухе во время пожаров 2010 и 2016 годов, их дисперсный состав полностью идентичен.
3. Выявлена обратная зависимость между количеством взвешенных частиц и содержанием их мелкодисперсного состава в 1 м^3 атмосферного воздуха на всах КВОУ ГТУ.

2.1.3. Слоистость приземного слоя тропосферы природный фактор, оказывающий заметное влияние на работу воздушных фильтров КВОУ ГТУ.

Атмосфера земли имеет слоистую структуру, которая является результатом температурных изменений на разных высотах. Атмосфера разделяется на тропосферу, стратосферу, мезосферу, термосфера и экзосферу [12].

Тропосфера - это самый нижний слой атмосферы, где сосредоточено до 80 % всей массы воздуха Земли, основное количество атмосферных примесей и практически весь водяной пар. Она характеризуется вертикальными конвекционными токами воздуха, относительным постоянством химического состава воздушных масс, неустойчивостью физических свойств: колебанием температуры воздуха, влажности, давления. Эти явления обусловлены тем, что Солнце нагревает поверхность почвы, от которой нагреваются нижние слои воздуха. Вследствие этого температура воздуха с увеличением высоты снижается, что в свою очередь приводит к вертикальному перемещению воздуха, конденсации водяного пара, образованию облаков и выпадению осадков. С поднятием на высоту температура воздуха снижается в среднем на 0.6 °С на каждые 100 м высоты. В зависимости от географической широты местности верхняя граница тропосферы находится в пределах от 7 до 18 км.

Приземный слой воздуха - это нижняя часть тропосферы (или пограничный слой), непосредственно прилегающая к земной поверхности. В приземном слое, толщина которого от 30 до 50 метров, проявляется механическое и тепловое воздействие земной поверхности на воздушные потоки, в результате чего возникает сильная турбулентность. Типичная высота установки КВОУ газотурбинных энергетических установок в составе блоков ПГУ над уровнем земли варьируется в диапазоне 10-15 м. С учетом радиального размера КВОУ (количества модулей по высоте), верхняя точка устройств достигает значения 30 м. Таким образом, КВОУ ГТУ работают в границе приземного слоя воздуха тропосферы.

На рис. 2.14 представлены результаты визуализации воздушных течений (скоростей) в приземном слое тропосферы. В результате выполненных исследований удалось установить, что не только сама атмосфера имеет слоистую структуру, но и в приграничном слое тропосферы присутствуют эти явления. Ввиду неоднородности воздушных потоков возникает неравномерное распределение взвешенных частиц в м³ приземного слоя воздуха.

Для определения изменения загрязненности воздуха в зависимости от точки забора пробы, 19.11. 2015 года на ТЭЦ в ЗАО в центре Москвы были взяты анализы воздуха на поверхности земли (под КВОУ), на высоте 2.0 м, 13.0 м, 16.5 м, 20.0 м. Рис.2.15. [13].



Рис. 2.14. Визуализация потоков в пограничном слое тропосферы (<https://clck.ru/33VsZD>)

Следует отметить, что перед КВОУ установлен забор высотой 3 м, являющийся естественной преградой для потоков воздуха, поступающих извне. Результаты выполненных замеров представлены на рис.2.15. Как видно, из представленных зависимостей, они имеют аналогичную изогнутую (S-образную) форму. Наибольшее количество взвешенных частиц в обоих случаях зафиксировано у поверхности земли. По мере перемещения точки забора проб вверх, отмечается ярко выраженная тенденция снижения количества взвешенных частиц до отметки 13.0 м (нижний ярус КВОУ). В диапазоне 13.0 – 16.5 м зафиксировано резкое увеличение запыленности воздуха на всасе КВОУ (второй ярус), соизмеримое с величинами, полученными на поверхности земли.

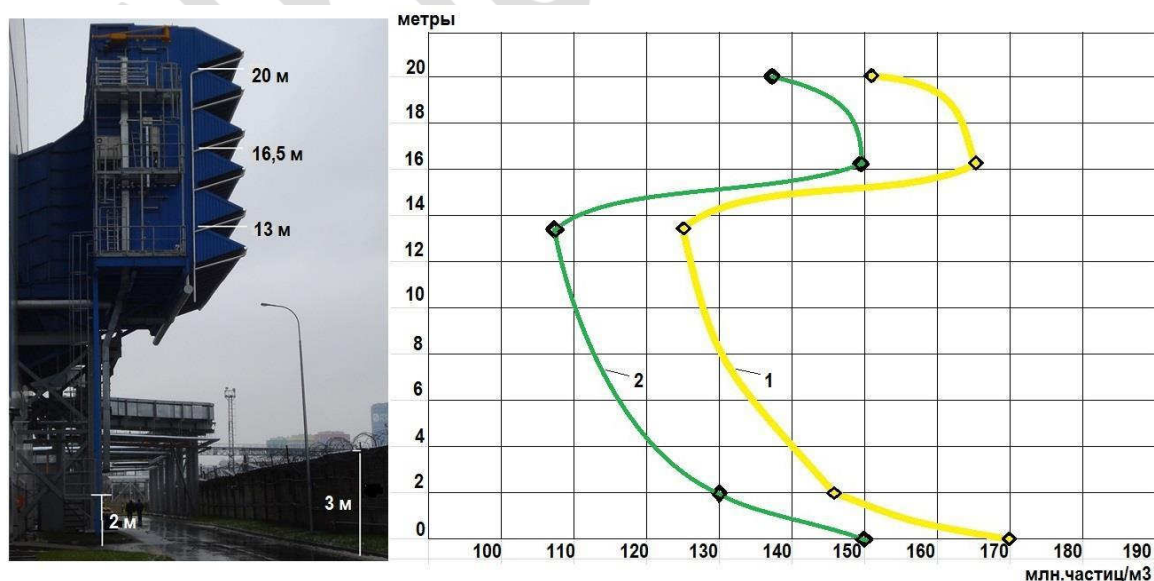
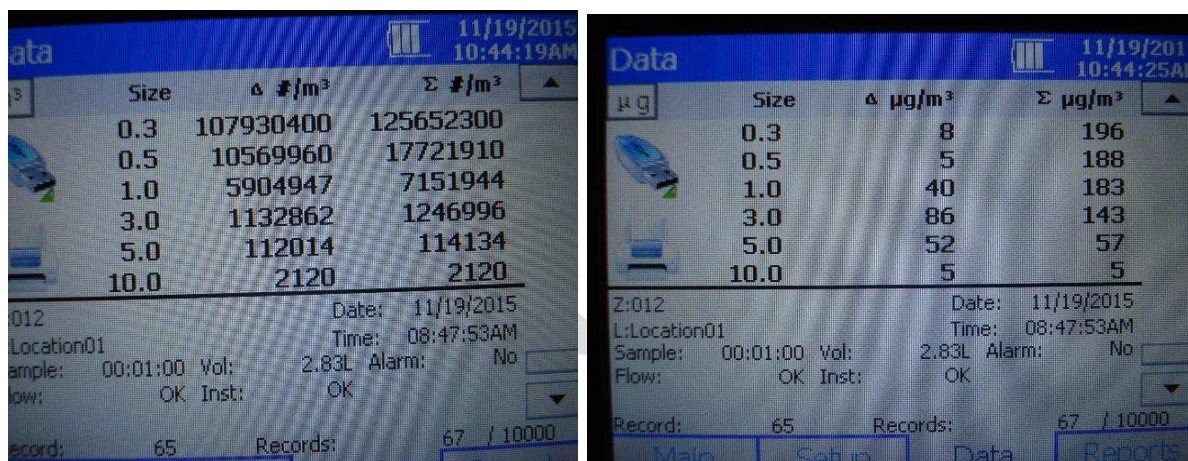


Рис.2.15. Распределение количества взвешенных частиц в атмосферном воздухе по высоте КВОУ ТЭЦ в ЗАО: 1- общее количество частиц; 2- количество частиц размером 0.3-0.5 МКМ

Далее, по высоте КВОУ, загрязненность воздуха снижается, достигая на отметке 20.0 м значений близких к результатам на высоте 2.0 м.

На рис. 2.16 приведены результаты замеров, выполненных на всасе нижнего яруса КВОУ ГТУ на высоте 13.0 м от земли, счетчиком частиц Aero Trak 9306-V2 (США) [13]. Показания прибора зафиксировали наименьшее количество и наибольшую концентрацию взвешенных частиц в м³ воздуха по высоте КВОУ ГТУ.



а

б

Рис.2.16. Количество (а) и концентрация (б) взвешенных частиц на всасе первого яруса КВОУ ГТУ

На Рисунке 2.17 представлены зависимости общего количества и концентрации взвешенных частиц в м³ воздуха. Как видно из представленных зависимостей, концентрация частиц имеет схожесть с кривой количества частиц только до высоты 2.0 м. Выше, картина меняется на противоположную – происходит резкий рост концентрации взвешенных частиц в м³ воздуха. Наибольшая величина концентрации зафиксирована на высоте 13.0 метров, то есть на всасе нижнего яруса КВОУ.

Таким образом, мы имеем ситуацию, когда наибольшее количество частиц поступало на второй ярус, а максимальная концентрация была отмечена на нижнем ярусе КВОУ. В тоже время, на отметке 16.5 м концентрация взвешенных частиц соизмерима с величиной на высоте 2.0 м от уровня земли.

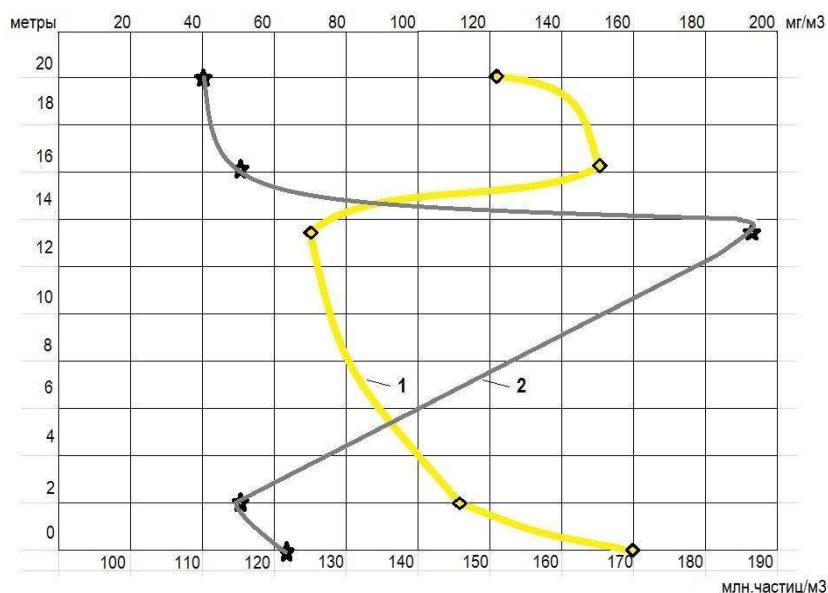


Рис. 2.17. Распределение суммарного количества (1) и концентрации (2) взвешенных частиц в м³ атмосферного воздуха по высоте КВОУ (19.11.2015).

Определим пылевую нагрузку на фильтры трех ярусов КВОУ при номинальном режиме работы ГТУ, при котором расход воздуха через компрессор составляет 428 м³/с. Результаты расчета приведены в Таблице 2.5.

Таблица 2.5. Результаты расчета пылевой нагрузки на фильтры КВОУ

Ярус КВОУ	C, мг/м ³	Пылевая нагрузка на фильтры		Разница между пылевой нагрузкой, раз
		мг/с	кг/ч	
1 (нижний)	196	83 888	302	1.0
2 (средний)	52	22 256	80.1	3.8
3 (верхний)	40	17 120	60.6	5.0

Из представленных данных можно сделать вывод, что срок службы фильтров на нижнем ярусе будет в 3.8 -5.0 раз ниже, чем на фильтрах других ярусов КВОУ. В случае резкого роста перепада давления на фильтрах первой ступени КВОУ и падения мощности ГТУ, знание результатов мониторинга запыленности воздуха на всасе воздухозаборного тракта, позволит быстро оценить причины происходящих процессов и принять правильные решения. Вместо замены всех фильтров первой ступени КВОУ в условиях эксплуатации, будет достаточно произвести замену заблокированных пылью фильтров на определенном ярусе. Это позволит значительно сократить сроки и трудозатры этой процедуры, а также финансовые издержки из-за необоснованного расходования фильтров.

На Рисунке 2.18 представлены результаты замеров, выполненных на той же ТЭЦ 29.03.2016 года [13]. Как и в первом случае (19.11.2015 года), изменение количество взвешенных частиц по высоте КВОУ имеет аналогичную изогнутую (S-образную) форму, что говорит о слоистости потоков воздуха.

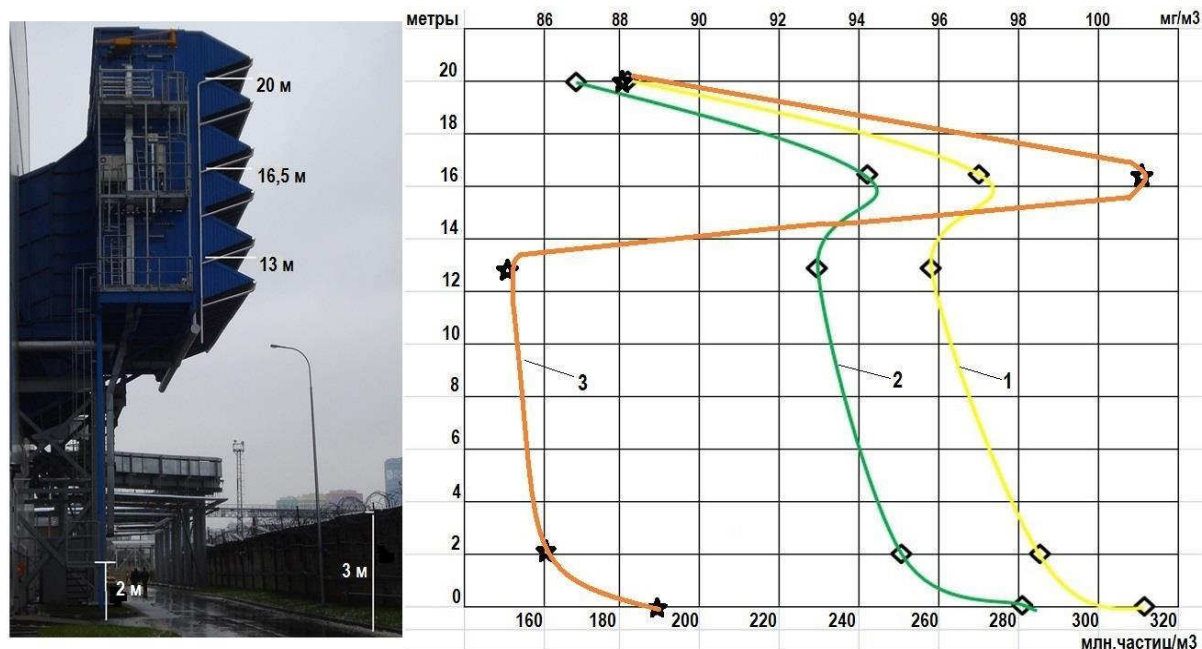


Рис. 2.18. Распределение количества и концентрации взвешенных частиц в м^3 атмосферного воздуха по высоте КВОУ (29.03.2016): 1- суммарное количество взвешенных частиц; 2- количество мелкодисперсных частиц (0.3 мкм); 3- суммарная концентрация взвешенных частиц.

Несмотря на то, что в данном случае количество взвешенных частиц в м^3 воздуха в 1.2- 2.0 раза превышает запыленность воздуха на всасах КВОУ в осенний период времени, наибольшее значение так же зафиксировано на втором ярусе. Отличием в весенний период времени является наименьшее количество взвешенных частиц на всасе верхнего яруса КВОУ. Другим отличием, от осенних замеров, является совпадение максимального значения количества и концентрации взвешенных частиц на втором (среднем ярусе) КВОУ.

Попробуем объяснить это отличие, сравнив дисперсный состав взвешенных частиц в слоях воздуха с наибольшей концентрацией на всасе КВОУ в обоих случаях. На рисунке 2.19 представлено процентное распределение количества и концентрации взвешенных частиц в м^3 воздуха 19.11.2015 года и 29.03.2016 года.

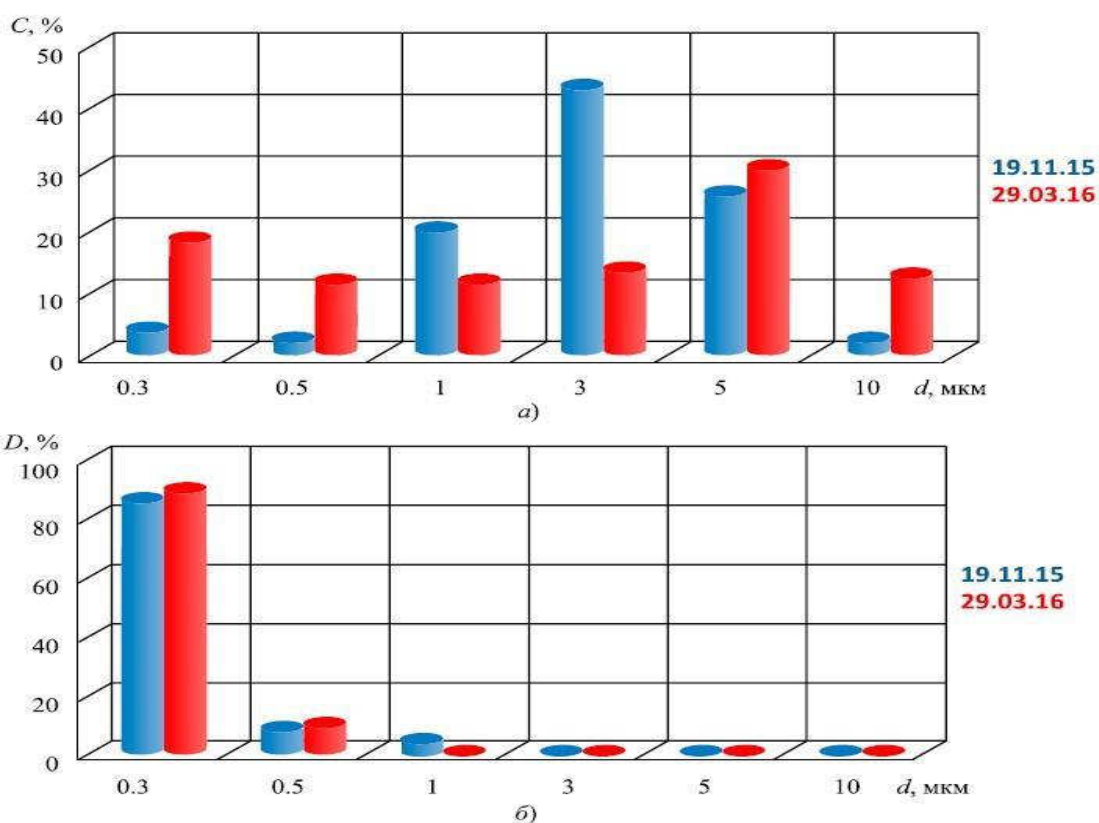


Рис.2.19. Распределение концентрации C (а) и дисперсности D (б) взвешенных частиц в атмосферном воздухе на ТЭЦ в ЗАО в воздушном слое наибольшей концентрации

Из представленной гистограммы (рис.2.19а) видно, что количество мелкодисперсных частиц 0.3 мкм в 2016 году больше, чем 2015 году на 4 %. При этом в 2015 году частиц размером 1.0 мкм на 4 % больше чем в 2016 году. Другими словами, имеет место перераспределение по дисперсности процентного содержания взвешенных частиц в атмосферном воздухе. Количество взвешенных частиц размером 3.0 мкм осенью 2015 года не достигало 1%, зато процентное содержание концентрации этих частиц превысило 43 %, что в 6.2 раза больше, чем в 2016 году (Рис.2.19б).

Концентрация частиц размеров 1.0 и 5.0 мкм так же была высокой и превышала значение 20%. Противоположная картина наблюдается с мелкодисперсными частицами размером 0.3 и 0.5 мкм. В 2015 году их концентрация составляла всего 4.0 и 2.5 %, что на 14.0 и 9.0 % соответственно меньше, чем весной 2016 года. В 2015 году процентное содержание концентрации частиц размером 1.0-10 мкм в м³ воздуха составляла 93.4%, а в 2016 году – 69.3%. При этом общая концентрация частиц 19 ноября была больше в 1.94 раза, чем 29 марта. Другими словами, 19.11. 2015 года наблюдалось расслоение потоков

воздуха с большим количеством и высокой концентрацией взвешенных частиц по высоте КВОУ. Это расслоение обусловлено наличием высокой концентрации крупных (тяжелых) взвешенных частиц в м^3 не способных подняться на высоту выше 13.0 м (нижний ярус КВОУ). 29.03.2016 года процентное распределение концентрации взвешенных частиц сместилось в сторону мелкодисперсных (легких) взвесей, движущихся вместе с превалирующим (с повышенным количеством частиц) слоем воздуха на уровне 16.5 м (среднего яруса) КВОУ.

Ярко выраженная слоистость воздушных потоков воздуха была зафиксирована 8 сентября 2016 года при выполнении мониторинга загрязненности воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ, расположенной на границе ЮАО и МО [13]. На рис. 2.20 стрелками обозначены слои потоков воздуха и на их фоне нанесены параметры запыленности воздуха на четырех ярусах КВОУ. Для фиксации границ различных слоев воздуха на всасе КВОУ, по его высоте указаны отметки уровней над поверхностью земли.

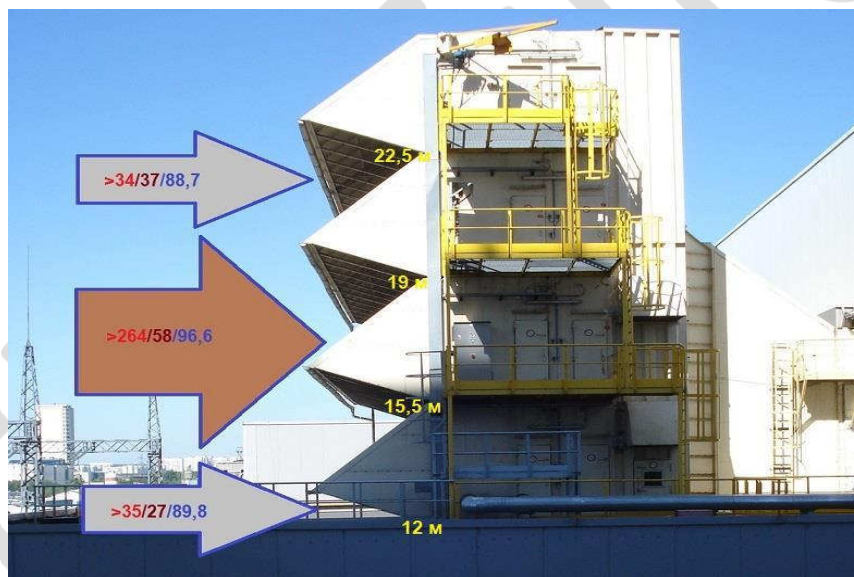


Рис. 2.20. Распределение слоев воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ: первое число – суммарное количество взвешенных частиц; второе – суммарная концентрация взвешенных частиц; третье – процентное содержание мелкодисперсных частиц 0.3 мкм в м^3 воздуха

Как видно из представленных данных на всас второго и третьего ярусов КВОУ поступает слой воздуха с наибольшим количеством (млн. частиц / м^3) и концентрацией ($\text{мг} / \text{м}^3$) взвешенных частиц, чем на крайние (нижний и верхний) ярусы. При этом, процентное содержание мелкодисперсных частиц (0.3 мкм) в этом потоке воздуха так же выше, чем в прилегающих к нему снизу и верху слоях воздуха. Общее количество

взвешенных частиц, поступающих на второй и третий ярус КВОУ, более чем в 7.5 раз превышает этот параметр на нижнем и верхних ярусах; концентрация - в 1.5 - 2 раза.

Для качественной оценки влияния различных слоев воздуха на работу воздушных фильтров КВОУ необходимо выполнить сравнительный анализ дисперсного состава взвешенных частиц в этих потоках. На рис.2.21 представлено процентное распределение количества (а) и концентрации (б) взвешенных частиц по дисперсности в нижнем и среднем слоях воздуха, поступающих в КВОУ ГТУ этой ТЭЦ.

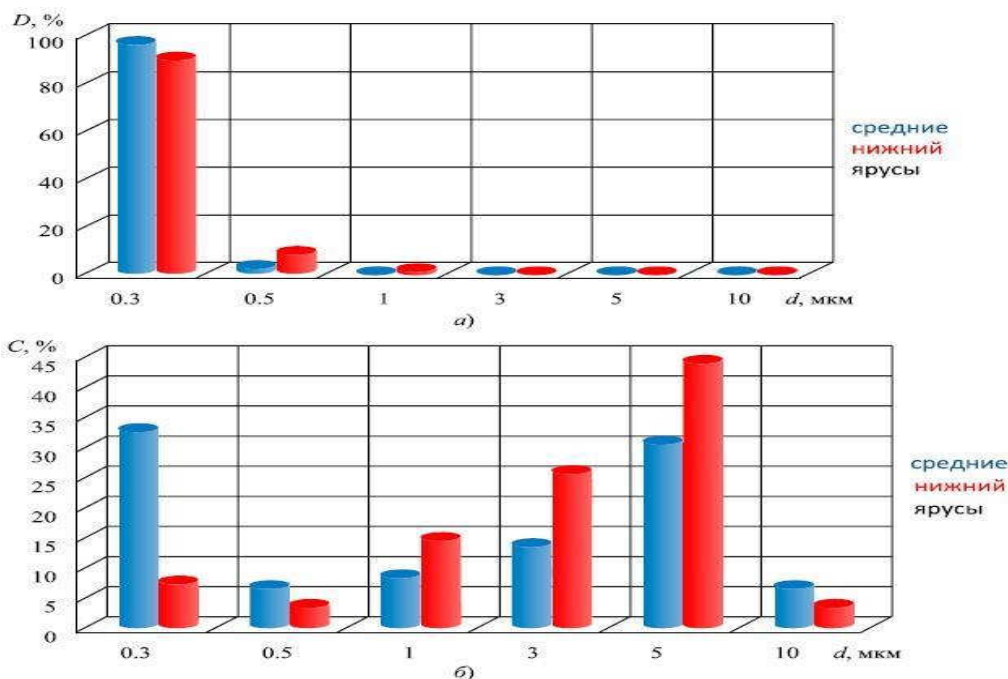


Рис. 2.21. Дисперсность D (а) и распределение концентрации C (б) взвешенных частиц в атмосферном воздухе на нижнем и средних ярусах КВОУ ГТУ

Как видно из представленных гистограмм на нижнем ярусе КВОУ наибольшая концентрация (44.4%) соответствует частицам 5 мкм, но их количество мизерно (0.06%) относительно общего количества взвешенных частиц. Поэтому существенного влияния на работу воздушных фильтров КВОУ эти частицы оказать не могут. На средних (втором и третьем) ярусах КВОУ наибольшая концентрация приходится на мелкодисперсные частицы 0.3 мкм. Концентрация этих частиц в границах слоя (32.8%) более чем в 4.4 раза превысила концентрацию на нижнем ярусе КВОУ (рис.2.21б). При этом процентное содержание мелкодисперсных частиц размером 0.3 мкм достигло значения 96.6%. Очевидно, что именно эти частицы будут оказывать основное, преобладающее влияние на работу фильтров КВОУ.

На первых ступенях КВОУ обычно устанавливаются коагуляторы и фильтры грубой

очистки с классом эффективности G4 согласно ГОСТ Р ЕН 779:2014, которые практически не улавливают мелкодисперсные частицы размером 0.3 мкм. Они предназначены для удаления из воздуха атмосферной влаги в виде дождя и крупнодисперсных частиц. Поэтому основная пылевая нагрузка ложится на фильтры тонкой очистки. Соизмеримые с концентрацией мелкодисперсных частиц в наиболее запыленном слое воздуха оказались частицы размером 5 мкм (Рис.2.21б). Но, и как в случае с нижним слоем воздуха, их количество оказалось несущественным (0.015%). Таким образом, из-за слоистости воздушных потоков с различными характеристиками запыленности, воздушные фильтры работают с неодинаковой по высоте КВОУ пылевой нагрузкой. Датчики перепадов давления, установленные в КВОУ, дают среднюю интегральную величину по ступеням фильтрации воздуха, что не отражает истинную картину загрязнения фильтров по высоте воздухозаборного тракта.

Многолетние исследования, выполненные нами на КВОУ ГТУ, показали:

1. В результате слоистости воздушных потоков с различными характеристиками запыленности, воздушные фильтры работают с неодинаковой по высоте КВОУ пылевой нагрузкой;
2. Срок службы воздушных фильтров меняется по высоте КВОУ в зависимости от уровней загрязненности воздушных слоев атмосферного воздуха;
3. Датчики перепадов давления, установленные в КВОУ, не отражают истинную картину загрязнения фильтров по высоте воздухозаборного тракта;
4. Для выполнения постоянного и корректного мониторинга состояния воздушных фильтров в процессе эксплуатации необходима модернизация воздухозаборных трактов ГТУ с установкой на каждом всасе и ярусе КВОУ дополнительных датчиков давления на каждой ступени фильтрации.

2.1.4. Ледяной дождь. Существуют и другие климатические явления, которые оказывают негативное влияние как на деятельность человека, так и на объекты электроэнергетики - **ледяной дождь**. Согласно [14] ледяной дождь - это твёрдые атмосферные осадки (охлажденные осадки), выпадающие при отрицательной температуре воздуха (чаще всего 0...-10°, иногда до -15°) в виде твёрдых прозрачных шариков льда диаметром 1-3 мм. Внутри шариков находится незамёрзшая вода — падая на предметы, шарики разбиваются на скорлупки, вода вытекает и образуется гололёд.

Гололед опасен, как для человека, так и работающего оборудования. Кривая статистики травматизма из-за многочисленных падений людей резко идет вверх, а очереди в травмпункты становятся многолюдными. Ледяной дождь покрывает электрические

столбы и кабельные трассы, которые под его весом могут оборваться, в результате чего произойдет обесточивание жилых домов и другой инфраструктуры большого мегаполиса (Рис.2.22).

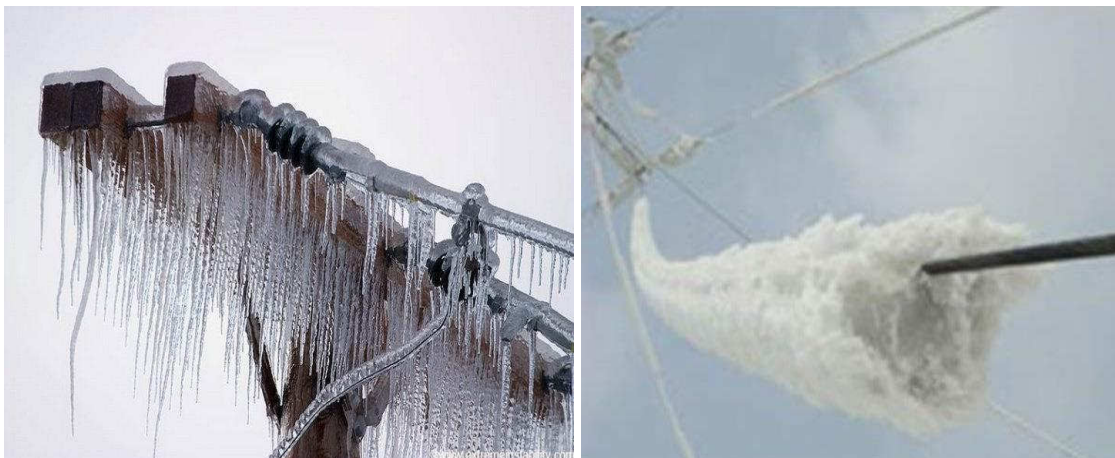


Рис.2.22. Ледяной дождь на: а-электрических столбах; б- на кабельных трассах (<https://stormandsky.com/09-1-28.html>, <https://clck.ru/33W23e>)

Ледяной дождь может оказывать негативное влияние и на систему очистки циклового воздуха КВОУ энергетических ГТУ. На рис.2.23 показано обледенение панельного фильтра первой ступени очистки КВОУ ГТУ во время ледяного дождя.



Рис.2.23. Обледенение панельного фильтра

В результате воздействия этого природного явления на систему фильтрации циклового воздуха энергетической ГТУ, фильтровальный материал фильтра-элемента сначала намокает под воздействием атмосферной влаги, а затем замерзает. По этой причине эффективная площадь фильтровального материала уменьшается, через замерзшую его часть воздух на вход ГТУ не поступает. Перепад давления на фильтре возрастает, что

негативно сказывается на выработке электроэнергии энергетической ГТУ. Возникает вынужденный перерасход топлива, используемый на покрытие недополученной мощности турбомашины. Кроме того, возникает опасность разрушения самого фильтра.

2.1.5. Цветение растений и двукрылые насекомые. Еще одним, сезонным явлением, нарушающим нормальный жизненный ритм больших городов и населенных пунктов, является весенне-летний **период цветения растений и размножения двукрылых насекомых**. Этот период времени характеризуется резким ростом количества насекомых и плодов цветения растений в воздухе. Концентрация этих насекомых бывает настолько велика, что фильтрующие элементы, установленные на всасе ГТУ “забиваются” (блокируются) ими в кратчайшее время. Там, где очистка циклового воздуха не была обеспечена должным образом или отсутствовала, лопадки компрессоров покрываются биомассой насекомых, попавших в проточную часть турбомашины.

На рис.2.24, изображены размеры останков насекомых, снятых с лопаток компрессора двигателя ГТЭ-20С в поселке Ямбург [15].

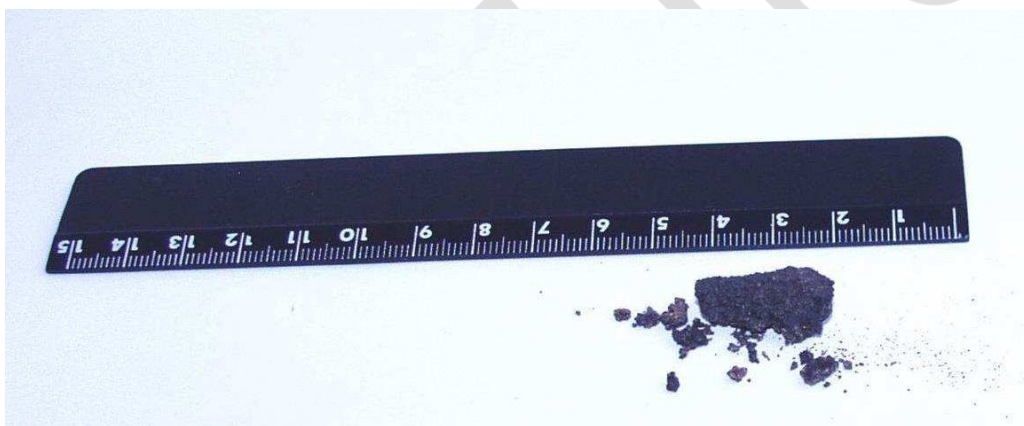


Рис.2.24. Биомасса насекомых, снятая с лопаток компрессора ГТЭ-20С

Актуальность этой проблемы становится еще больше очевидной, если вспомнить, что территория тайги, смешанных лесов, лесотундры и тундры, где обитают в изобилии эти насекомые, составляет более 80% территории нашей страны. Поэтому, несмотря на более низкую по сравнению с другими зонами концентрацию пыли в этой зоне, требования по очистке циклового воздуха двигателей не должны снижаться. Они должны смещаться в сторону других приоритетов.

Кто же такие двукрылые и что они из себя представляют?

Двукрылые (Diptera), отряд насекомых, характеризующихся наличием одной пары крыльев. Это одна из обширнейших и наиболее широко распространенных групп насекомых. В настоящее время учёными описан 160 591 вид двукрылых насекомых. К

этой группе относятся такие хорошо известные всем виды, как настоящие мухи, настоящие комары, москиты, мокрецы, слепни, оводы и другие [16].

Многие виды двукрылых наиболее известны как кровососущие и переносчики заболеваний человека и животных. Кровососущими в основном являются самки двукрылых насекомых, поскольку у самцов ротовая полость недоразвита.

Комары – основные переносчики болезней (Рис.2.25). Около 30 видов рода *Anopheles* являются *Aedes aegypti* и некоторые другие комары распространяют вирусы желтой лихорадки и денге. Среди родов *Culex* и *Aedes* известны переносчики различных вирусных энцефаломиелитов, хозяевами паразитических простейших – возбудителей малярии. Виды *Aedes*, *Culex*, *Anopheles* и *Mansonia* могут заражать людей мелкими паразитическими червями (нематодами надсемейства Filarioidea), вызывая филяриозы, которые в тяжелых случаях приводят к «слоновости», т.е. сильному утолщению кожи и подкожной клетчатки различных частей тела. Зафиксировано свыше 25 тысяч видов комаров. Одной из разновидностей комаров являются (Рис.2.25б).

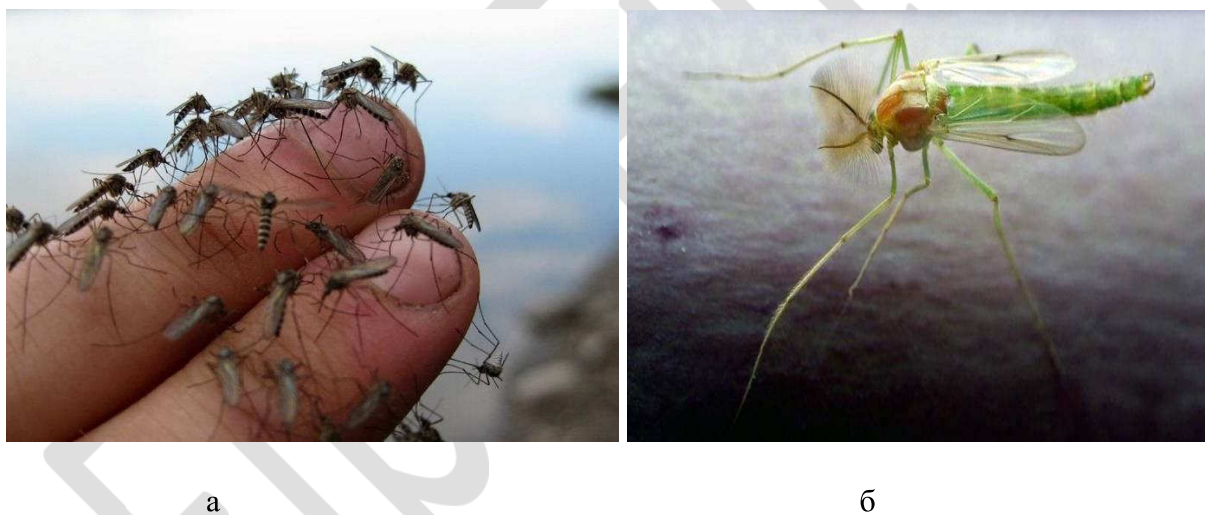


Рис.2.25. Комары: а- комар обыкновенный (<https://traveltimes.ru/эффективные-способы-борьбы-с-комарами/>); б- комар –звонец (<https://clck.ru/33XBfc>)

Название комар получил из-за характерного звука, который получается из-за того, что комар машет крыльями до 1000 взмахов в секунду. Взрослые особи вообще не питаются, их ротовые органы недоразвиты, поэтому этот вид комаров не кусается и не пьет кровь. В повседневной жизни их называют “зелеными” из-за окраски тела.

Москиты, относящиеся к семейству бабочниц, распространяют различные болезни. *Phlebotomus papatasi* при кровососании может передавать вирус лихорадки паппатачи; *Phlebotomus verrucarum* – риккетсий, вызывающих лихорадку Ороя; другие виды этого

рода – паразитических простейших лейшманий, являющихся возбудителями заболевания кала-азар (индийского висцерального лейшманиоза).

Мошки, в частности пять видов рода *Simulium*, заражают человека паразитическими червями, вызывающими онхоцеркоз, часто приводящий к слепоте (так называемая «речная слепота»).

К крупным кровососущим двукрылым насекомым относятся *слепни*. Самка слепня способна за одно кровососание принять до 200 мг крови, т.е. столько, сколько выпивает 70 комаров или 4000 мокрецов. Во время кровососания слепни переносят возбудителей сибирской язвы и других тяжелых заболеваний.

На суше не найдется, пожалуй, такого уголка, где бы не обитали двукрылые. Это самый распространенный отряд насекомых. Двукрылыми изобилуют влажные тропики. Распространение большинства семейств этой природной зоны и ограничивается, а многие другие достигают здесь максимума разнообразия и численности. В умеренных или холодных областях на единице площади встречается меньше видов двукрылых, но численность их особей часто не ниже, чем в тропиках. В продуваемой ветрами арктической пустыне, на вершинах гор и среди барханов, где суровые климатические условия не подходят большинству насекомых, двукрылые остаются наиболее заметными представителями этой группы беспозвоночных. На севере Гренландии, в нескольких сотнях километров от Северного полюса, встречаются долгоножки, падальные мухи, цветочницы, звонцы и грибные комарики. На другом краю Земли, на антарктических островах, водится несколько видов мошек, журчалок, долгоножек, галлиц и некоторых других групп. В самой Антарктиде пока отмечен всего один вид бескрылых комаров, но вполне вероятно, что там будут найдены и другие двукрылые.

В умеренных широтах двукрылые наиболее многочисленны в лесной зоне, где различные их виды питаются нектаром, пыльцой или соком, вытекающим из стволов деревьев. Они летают среди растений нижнего яруса, отдыхают на листве, ветвях, в щелях под камнями или упавшими деревьями. В лесу и сельской местности можно встретить настоящие полчища двукрылых после одновременного вылета миллионов взрослых особей из ближайших водоемов (Рис.2.26).



Рис.2.26. Полчища двукрылых насекомых в США штат Винконсин (<https://click.ru/33ZRdr>)

Болота и другие влажные места изобилуют комарами, слепнями и прочими менее заметными двукрылыми. Они в массе встречаются по берегам озер и на морских побережьях: личинки одних развиваются в воде или на водной растительности, а другие прилетают сюда в поисках корма – остатков выброшенных на сушу организмов или кишащих здесь более мелких насекомых.

Двукрылые могут слетаться на свет вместе с насекомыми других видов, представляя из себя движущуюся биомассу. Комары, звонцы и долгоножки роятся ближе к сумеркам, обычно над кустарниками, дорожками или другими ориентирами, вблизи которых рой, если его спугнуть, собирается вновь. Такие группы состоят главным образом из самцов; считается, что шум их крыльев своим характерным тоном привлекает самок. Однако, не только в лесу и сельской местности можно наблюдать полчища насекомых. Газетные публикации в весенне - летний период времени выглядят как сводки с театра боевых действий. 28 мая 2018 г.: “Воронеж атакуют полчища комаров. На борьбу с "кровопийцами" регион потратил уже 13 миллионов рублей”. “Ростовскую область атаковали комары 18 августа 2018 года”.

“28 августа 2018 года в Таганроге на юго-западе Ростовской области зафиксирован типичный для этого времени года и жаркой погоды массовый вылет комаров - звонцов, хирономидов. Ими буквально усеяны набережные города и примыкающие к ним здания домов” (Рис.2.27а).



а

б

Рис.2.27. Нашествие комаров звонцов в г. Таганроге: а- в 2018; б- в 2021 году (<https://privet-rostov.ru/gorod/70181-ogromnye-polchischa-komarov-atakovali-rostovskuju-oblast.html>)

Ранее в 2017 году, таганрогские “зелёные комары”, стали героями сюжета на сайте английского таблоида “The Sun”. Материал называется “Момент безумия” — “Тучи комаров вторгаются в город России и терроризируют его”. Аналогичные нашествия комаров звонцов происходят в этом городе систематически (Рис.2.27б).

В обширном отряде двукрылых наблюдается огромное разнообразие размеров, формы и окраски тела. Длина некоторых галлиц всего 0,4 мм при размахе крыльев чуть более 1 мм. Австралийские ктыри достигают в длину 50 мм, а размах крыльев отдельных тропических долгоножек превышает 100 мм. Длина комаров составляет от 0,5 мм (мокрецы) до 30 мм (долгоножки). На рис.2.28 показан размер комара на фоне мерной линейки.

© ALAN HENDERSON



По данным Брокгауза Ф.А. и Ефрона И.А. [17] длина комара обыкновенного – *Culex pipiens L. (vulgaris L.)* составляет около 6,5 мм. Комары - звонцы (*Chironomidae*, “зеленый комар”) заметно крупнее своего кровососущего собрата – комара-пискуна, и достигает в длину 15 мм.

На Севере нашей страны, например, в Санкт - Петербурге, распространен москит *Simulia reptans*, имеющий длину 2,5 - 3 мм, чернобурый, с серебристо-серыми краями спинки и брюшка и с желтоватым основанием брюшка, голени белые. Здесь он является только тягостным для населения и животных насекомым, но в Лапландии и в Швеции представляет истинное бедствие. По данным Перфильева П.П. полученным еще в шестидесятые годы прошлого столетия, длина москитов составляет 1,2 – 3,7 мм [18]. Длина мух настоящих составляет от 2- 15 мм. Самый мелкий вид муха- горбатка имеет длину 0,4 мм, самые крупные до 6 см.

На рис.2.29 представлен снимок скелета двукрылого насекомого, полученного с помощью электронного сканирующего микроскопа при большом увеличении.

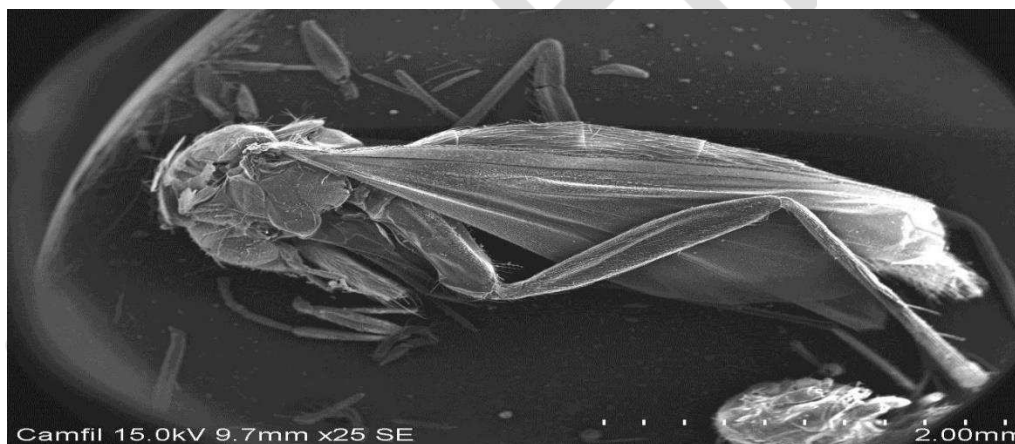


Рис.2.29. Скелета двукрылого насекомого

Ниже в таблице 2.6 приведены осредненные данные размеров двукрылых насекомых, полученные из разных источников. Представленные в таблицы данные о размерах двукрылых представляют практический интерес для разработки устройств, защищающих от них персонал станций и двигатели. Для более эффективной работы устройств, предотвращающих попадание двукрылых насекомых в проточную часть конкретных двигателей необходимо знать точные размеры и численность этих насекомых в районе электростанции. Для этой цели осуществляется отлов и учет насекомых.

Таблица 2.6. Осредненные размеры двукрылых насекомых [19]

СРЕДНЯЯ ДЛИНА ДВУКРЫЛЫХ, мм	
Жужжало	6–13
Большоголовка	6
Мошка	до 3
Златоглазик	13
Гессенская муха	6
Овод желудочный	13–20
Слепень бычий	20–25
Рунец овечий	3
Комар обыкновенный	6-7
Комар - звонец	15
Комар долгоножка	до 30
Пятнокрылка	13
Ктырь	25
Овод подкожный	20
Журчалка	25
Ежемуха	6
Американская меромиза	6
Москит	1,5- 3,5

2. Плоды цветения растений

Другим важным сезонным фактором, влияющим на качество жизни населения и работу технических средств, оказывает цветение растений. Помимо аллергии и астмы, затруднения дыхания у части людей, цветение ряда растений вызывает большие проблемы при эксплуатации энергетического оборудования. Одним из таких растений является тополь.

Тополь

Точные сроки цветения тополя зависят от климатической зоны. Примерно, цветение тополя приходится на апрель-май, до появления или одновременно с появлением первых

листочков, а вот, так раздражающий нас, тополиный пух — это созревшие плоды тополя с семенами, через два месяца в июне-июле, покрывая все вокруг “ковром ваты” (Рис.2.30а).



а

б

Рис.2.30. Тополиный пух: а- везде; б- цветение (<https://golos.id/ru--topolya/@rvsn/topolinyi-pukh-zhara-iyul>)

Надо помнить, что эта “вата” прекрасно горит и пожарные даже называют тополиный пух “бикфордовым шнуром”. Статистика печальная: в “тополиный период” по Москве в прошлые годы загоралось от такого “бикфордова шнура” до 20 машин в день!

Тополя в озеленении городов стали применять с 1946 года [20]. После Великой Отечественной войны нужно было максимально быстро восстановить облик Москвы и заменить утраченные деревья. Для этой цели дендрологи предложили тополь бальзамический, который отличается быстрым ростом, густой кроной, легкостью размножения, устойчивостью к городским условиям, декоративным внешним видом, занимает меньшую площадь, чем другие деревья, благодаря компактности кроны, относительно дешев. Предложение было рассмотрено, программа озеленения утверждена Сталиным И.В., в Москву пришли тополя и начали свое победное шествие по всей стране. Тополь – растение двудомное, то есть у него есть деревья мужские и женские. Мужские цветут, давая пыльцу, опыляя женские, а женские уже дают семена, снабженные пуховыми летучками (Рис.2.30б). Возникает резонный вопрос — Неужели нельзя было высадить только мужские экземпляры? Так ведь именно это и было сделано! Высаживались только мужские растения – и это стало роковым стечением обстоятельств. Природу не обманешь, и это прекрасно показал пример с тополями.

Известно, что растения, некоторые животные и насекомые в определенных ситуациях, приспосабливаясь к условиям жизни, способны менять пол. Ведь деревья должны были размножаться, вот они и нашли выход. К всеобщему ужасу и неудовольствию ботаники, дендрологи, и другие специалисты отрасли наблюдали появление женских сережек на мужских тополях, на ветвях рядом с мужскими цветками.

Ради справедливости надо отметить, если бы не тополиный пух, тополь был бы самым лучшим деревом для озеленения городов. За лето каждый тополь улавливает около 35 килограммов пыли. Каждый тополь – маленькая кислородная фабрика. Для сравнения: семь елей, четыре сосны и три липы выделяют столько кислорода, сколько один тополь.

Одуванчик

Другим растением, оказывающим существенное влияние на работу энергетического оборудования, является одуванчик. Одуванчик (лат. *Taraxacum*) — род многолетних травянистых растений семейства Астровые, или Сложноцветные. Типовой вид рода — Одуванчик лекарственный — хорошо известное растение с розеткой прикорневых листьев и крупными ярко-жёлтыми соцветиями-корзинками из язычковых цветков. Плоды одуванчика- веретенообразные, серовато-бурые продольно-ребристые семянки размером 3-5 мм, с длинным тонким носиком (длиной 7-12 мм), на котором располагается хохолок из белых мягких волосков [21]. При плодоношении верхушка стрелки одуванчика представляет собой идеальный шар, образованный сомкнутыми между собой хохолками плодов (Рис.2.31а). С их помощью плод одуванчика может перелетать в воздушных потоках на большие расстояния, засевая значительные площади земли (Рис.2.31б).

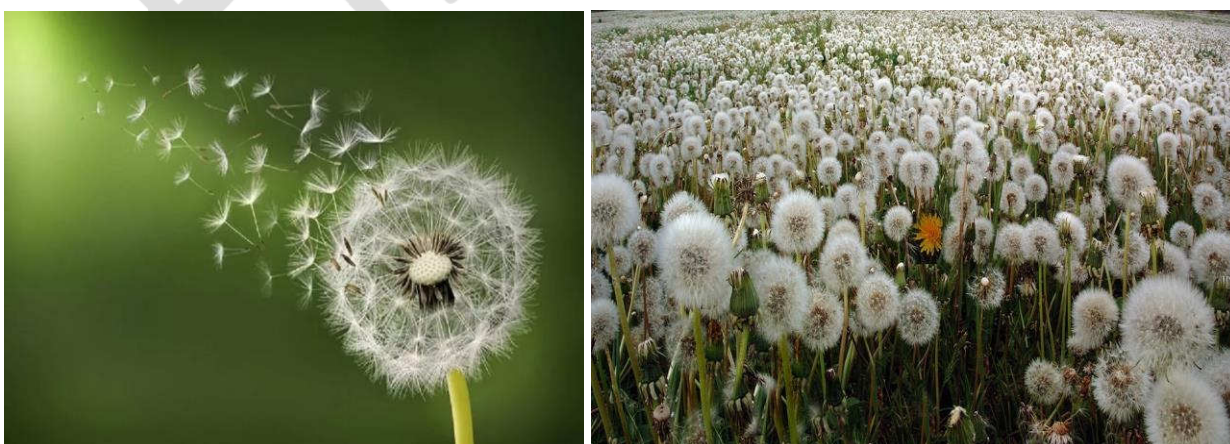


Рис.2.31. Одуванчики: а – плодоношение одуванчиков; б- обширное поле (<https://photos-faces.com/31341715/>)

Цветение одуванчиков начинается в последнюю неделю апреля и продолжается весь месяц май. Затем их небольшое цветение можно наблюдать и в течении всего лета. Бурное цветение одуванчиков, покрывающих своим белым “ковром” большие промышленные территории, сопровождается одновременным подъемом в воздух миллиардов “зонтиков” с семенами, которые засасываются в воздухозаборные устройства турбомашин. Поскольку одуванчик является многолетним травянистым растением, проблемы с его цветением возникают ежегодно в весенне – летний период эксплуатации оборудования. Превентивные меры по многократному скашиванию одуванчиков до начала их цветения, принимаемые на энергетических объектах, дают определенные результаты по снижению загрязнения циклового воздуха турбомашин, но не решают эту проблему полностью.

В табл.2.7 приведены размеры пыльцы отдельных видов растений (<https://clck.ru/33XDzf>).

Табл. 2.7. Размеры пыльцы отдельных видов растений

Пыльца березы	19-20 мкм
Амброзии	18-19 мкм
Пыльца крапивы	13-15 мкм
Крупинки пыльцы	10-100 мкм

Двукрылых насекомых и плоды цветения растений оказывают существенное воздействие на систему фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ. На рис.2.32. зафиксировано проникновение насекомых в воздушные фильтры и тополиного пуха на всас КВОУ энергетической ГТУ.



Рис.2.32. Загрязнение системы фильтрации циклового воздуха ГТУ: а- двукрылые насекомые в кассетном фильтре тонкой очистки; б-тополиный пух на всасе КВОУ.

Рост перепада давления в системе очистке атмосферного воздуха влечет за собой с технической точки зрения уменьшение срока жизненного цикла воздушных фильтров, снижение выработки мощности энергетической ГТУ, возрастание расхода топливного газа, а с экономической - увеличение себестоимости вырабатываемой электроэнергии и рост финансовых затрат на обслуживание ГТУ.

2.1.6. Пернатые. Еще более актуально задача по обеспечению надежной работы газотурбинной техники и спасению человеческих жизней стоит в авиации. Одной из причин, угрожающей безопасности полетов самолетов и приводящей к повреждению авиационных двигателей являются **пернатые**. На Рис.2.32, сделанном в аэропорту Стамбула (Турция), запечатлено опасное сближение чайки с летящим самолетом.

Ярким и героическим событием стало спасение 226 пассажиров самолета Airbus A321 авиакомпании “Уральские авиалинии” 15.08.2019 г. после аварийной посадки в результате попадания птиц в проточную часть обоих турбовентиляторных двигателей.

На рис. 2.33. показаны последствия попадания птицы в проточную часть авиационного двигателя. В худшем случае в двигателе может возникнуть помпаж и его разрушение, которое приведет к трагическим последствиям с самолетом.



Рис.2.33. Сближение чайки с самолетом (<https://clck.ru/33Xj84>)



Рис.2.34. Последствия попадания птицы в авиадвигатель (<https://clck.ru/33Trog>)

Попадание птиц в воздухозаборный тракт энергетической ГТУ не повлечет за собой трагических последствий с гибелью людей, но увеличит перепад давления в КВОУ, что отразится на расходе топливного газа для поддержания заданной нагрузки системным оператором. При попадании посторонних предметов (мусора) в теплообменный аппарат (систему антиайсинга) КВОУ ГТУ снижается конвективный теплообмен между теплоносителем и обогреваемыми элементами (Рис.2.35).



Рис.2.35. Теплообменный аппарат КВОУ ГТУ с мусором

В результате чего, в зимний период времени может возникнуть обледенение и занос снегом фильтров элементов, установленных в КВОУ ГТУ (Рис.2.36).



Рис.2.36. Занос снегом фильтров КВОУ ГТУ

Все риски для человека и работы энергетического оборудования, вызванные негативным воздействием природных (климатических) факторов, необходимо устранять или минимизировать с помощью организационно-технических мероприятий.

Известными техническими средствами, позволяющими защищаться от различного типа загрязнений являются воздушные фильтры. Разнообразие природных источников загрязнений диктует необходимость создания различных систем очистки воздуха от каждого конкретного вызова.

К сожалению, помимо природных факторов, влияющих на жизнедеятельность людей и эксплуатацию оборудования, негативное влияние на них оказывают рукотворные источники, созданные в результате хозяйственной деятельности человека.

Человек, который совершил ошибку
и не исправил ее, совершил еще одну ошибку
Конфуций

2.2. Рукотворные источники загрязнений

Данный вид загрязнений обусловлен в основном человеческими ошибками, совершенными во время проектирования, как жилых, так и промышленных объектов, а также в процессе повседневной деятельности. В основе этих ошибок лежат либо незнания, либо не учет климатических условий, а также не выполнения требований руководящих документов. Рассмотрим некоторые из них.

2.2.1. Ошибки проектных решений по размещению оборудования

В 2005-2006 годах велось проектирование ГТУ-ТЭЦ для ТЭЦ в ЮАО Москвы, в состав которой первоначально входила ГТЭ-65 (ЛМЗ), а затем ГТУ АЕ64.3А (Ansaldo Energia, Италия). Размещение оборудования ГТУ-ТЭЦ проектным институтом было осуществлено таким образом, что **КВОУ установлено перед стеной помещения котла утилизатора** (Рис.2.37). Для обеспечения подвода расчетного количества циклового воздуха к ГТУ было принято решение о разработке ВЗТ с тремя всасами. В процентном отношении распределение периметров всасов в КВОУ составляет по 9% справа и слева, и 82 % по центру.



Рис. 2.37. КВОУ ГТУ ТЭЦ перед стеной котла утилизатора (<https://clck.ru/33XTga>)

Для снижения влияния атмосферных осадков на работу воздушных фильтров КВОУ, его всасы оснащены погодными козырьками. Помещение котла утилизатора (КУ) затеняет (перекрывает) 82,4% центрального всаса КВОУ. Погодные козырьки центрального всаса КВОУ расположены на расстоянии менее 1,5 м от стенки котла утилизатора. КВОУ.

Определение положения (рекогносцировка) КВОУ на территории ТЭЦ относительно “розы ветров” было выполнено с помощью глобальной навигационные системы ГЛОНАСС и сверено с генеральным планом ТЭЦ. Голубая стрелка на Рисунке 2.38 указывает центральный всас КВОУ [22].

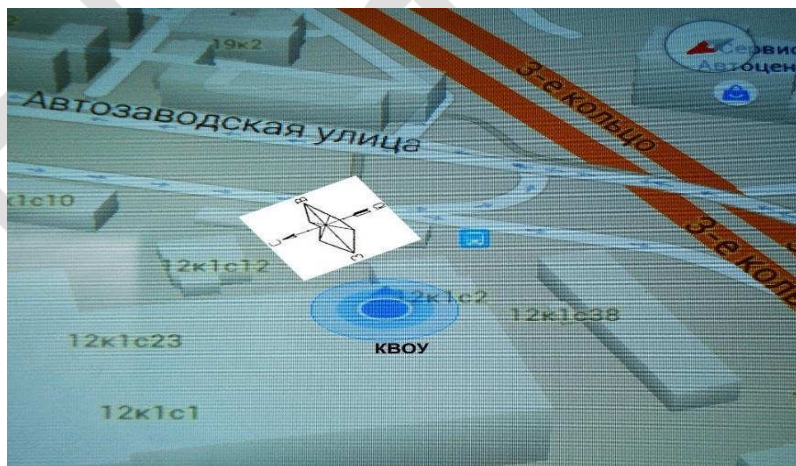


Рис.2.38. Рекогносцировка положения КВОУ относительно “розы ветров” на ТЭЦ.

Как видно из Рисунке 2.38 преобладающим направлением ветра, согласно “розы ветров”, является западное. Правый всас КВОУ ориентирован в сторону третьего транспортного кольца Москвы, а левый - на территорию ТЭЦ.

Анализируя расположение КВОУ относительно “розы ветров”, можно было бы предположить, что, поскольку, большая часть центрального всаса КВОУ закрыта стенкой КУ, то негативное воздействия загрязняющих веществ, приносимых вторым по повторяемости восточным направлением ветра, будет незначительным. Однако, результаты мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на всасах КВОУ ГТУ говорят об обратном.

На Рисунке 2.39 приведены графики процентного распределения количества и концентрации взвешенных частиц в м³ атмосферного воздуха по всасам КВОУ, построенные по результатам замеров, выполненных в течение четырех времен года 2015-2017 годов. На всех графиках виден ярко выраженный экстремум концентрации частиц (мг/м³) на центральном всасе КВОУ (от 55 до 97%), характеризующий неравномерное по всасам поступление массы загрязнений на воздушные фильтры вне зависимости от времени года. Процентное распределение количества частиц в м³ атмосферного воздуха по всасам КВОУ не так однозначно. Только при высокой концентрации частиц равной 97% наблюдалось совпадение направления экстремумов обеих величин (смотри Рисунки 2.39в и 2.39д). В остальных случаях зафиксировано примерно одинаковое процентное распределение количества частиц, поступающих на всасы КВОУ [22].

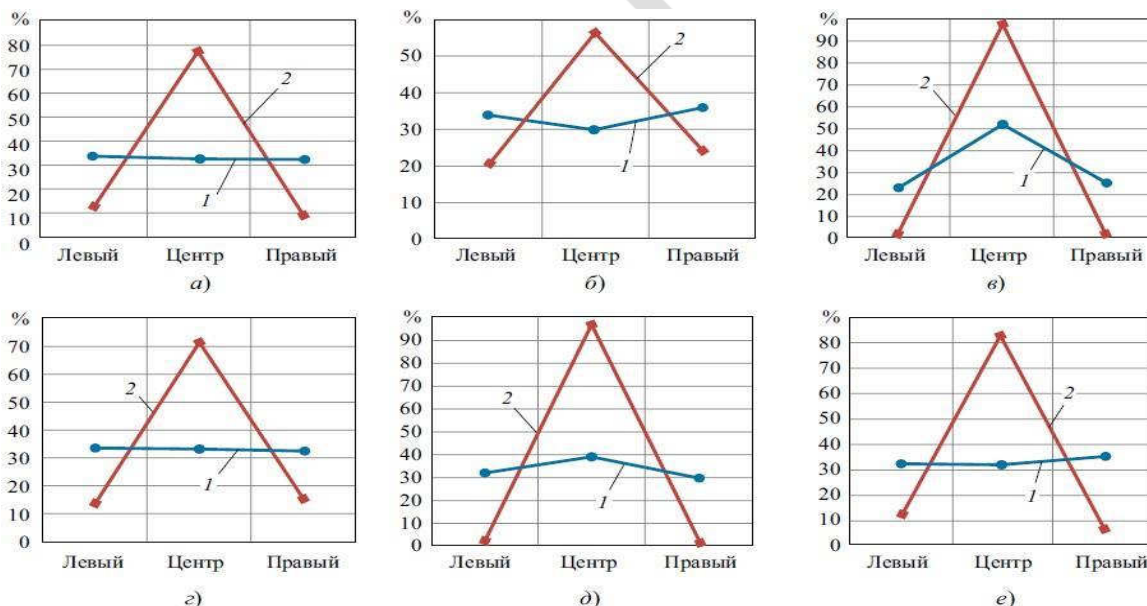


Рис. 2.39. Процентное распределение количества (1) и концентрации (2) взвешенных частиц в м³ атмосферного воздуха по всасам КВОУ: а - 02.11.2015; б - 04.05.2016; в - 13.05.2016; г - 03.06.2016; д - 09.01.2017; е - 11.05.2017

Абсолютные значения замеренных значений количества и концентрации взвешенных частиц в атмосферном воздухе на центральном всасе КВОУ приведены в Таблице 2.8.

Таблица 2.8. Результат мониторинга атмосферного воздуха на центральном всасе КВОУ

Дата замера	Количество частиц в м ³	Концентрация частиц, мг/м ³	Содержание частиц размером 0.3 мкм, %	Температура воздуха, °С
02.11.2015	255 589 100	610	87.6	+8
04.05.2016	84 070 670	150	89.0	+19
13.05.2016	67 592 220	1434	47.2	+9
03.06.2016	79 793 990	273	86.9	+18
09.01.2017	397 780 900	3829	75.1	-20
11.05.2017	52 503 890	1351	85.8	+4

Интересным представляется сравнение результатов замеров, выполненных в течение нескольких дней мая 2016 и 2017 года. Из Таблицы 2.8 видно, что с ростом температуры атмосферного воздуха количество частиц в м³ атмосферного воздуха возрастает, а с ее понижением - убывает. Аналогичная зависимость от температуры воздуха наблюдается и с процентным содержанием мелкодисперсных частиц 0.3 мкм. Это объясняется тем, что с ростом температуры атмосферного воздуха земля прогревается и в воздух поднимается большее количество мелкодисперсных частиц пыли. Эту тенденцию подтверждают и результаты замеров, выполненные в июне 2016 года.

В осенне-зимний период в атмосферном воздухе присутствует большое количество взвешенных аэрозолей и твердых кристаллов льда, поэтому абсолютные значения этого параметра в данный период времени выше, чем в другие времена года.

Особое внимание при анализе мониторинга обращают на себя высокие значения концентрации взвешенных частиц в м³ атмосферного воздуха на центральном всасе КВОУ. Концентрации пыли ≥ 500 мг/м³ фиксировалась во время пылевых бурь в пустынях [23]. При такой концентрации частиц в атмосферном воздухе обычно применяют не статическую, а импульсную систему очистки циклового воздуха ГТУ. Правда, ее эффективное применение возможно только в одном случае, если это частицы песка и сухой пыли без примеси несгоревших углеводородов от выхлопа автомобильного транспорта. В случае ТЭЦ использование импульсной очистки циклового воздуха ГТУ не целесообразно в связи с расположением рядом с третьим транспортным кольцом.

Проанализируем результаты замеров количества, концентрации взвешенных частиц и скорости потока на всасах КВОУ, выполненные 13 мая 2016 года (Рис. 2.40) [22].

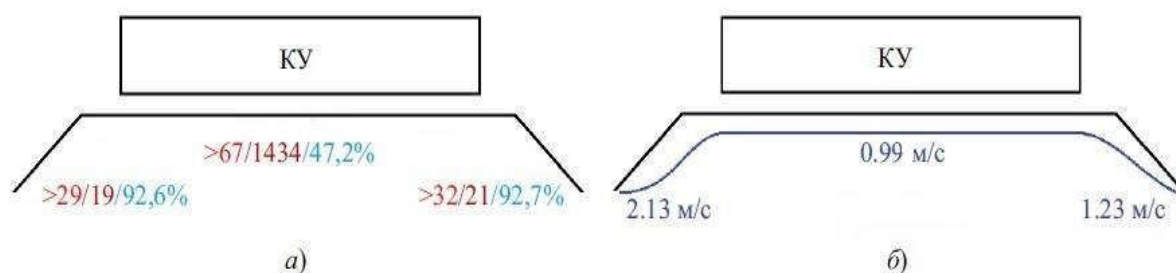


Рис. 2.40. Результаты мониторинга потока атмосферного воздуха на всах КВОУ 13.05.2016: а - количество, концентрация и процентное содержание мелкодисперсных частиц 0.3 мкм; б – скорость потока атмосферного воздуха на всах КВОУ.

Общее количество частиц в центре КВОУ в 2 раза, а общая концентрация в 68.3- 75.5 раз больше, чем на других всах. При этом процентное содержание мелкодисперсных частиц на центральном всасе КВОУ очень низкое и составляет всего 47.2%, что, примерно, в 2 раза меньше величин замеров на других местах. В тоже время, скорость потока воздуха на центральном всасе КВОУ, из-за его размещения перед КУ, ниже, чем на других всах (смотри рис.2.40б).

Логично было бы иметь большее количество и концентрацию взвешенных в м³ атмосферного воздуха частиц при высокой скорости воздушного потока преобладающего направления. Однако, в данном случае, этого не происходит из-за специфического расположения КВОУ ГТУ.

Таким образом, концепция, которой, вероятно, придерживался проектный институт, предполагая, что размещение КВОУ перед КУ снизит количество и концентрацию загрязняющих частиц на центральном всасе ВЗТ, оказалась несостоятельной.

Проанализируем распределение количества и концентрации взвешенных частиц в м³ атмосферного воздуха в зависимости от их дисперсности перед всасами КВОУ. На рисунке 2.41а приведена гистограмма процентного распределения этих показателей от дисперсности частиц на центральном всасе КВОУ. Как видно, из представленных данных, наибольшее количество зафиксировано для мелкодисперсных частиц размером 0.3 мкм - 47.2%, а наибольшая концентрация для частиц 5 мкм- 53.2% [22].

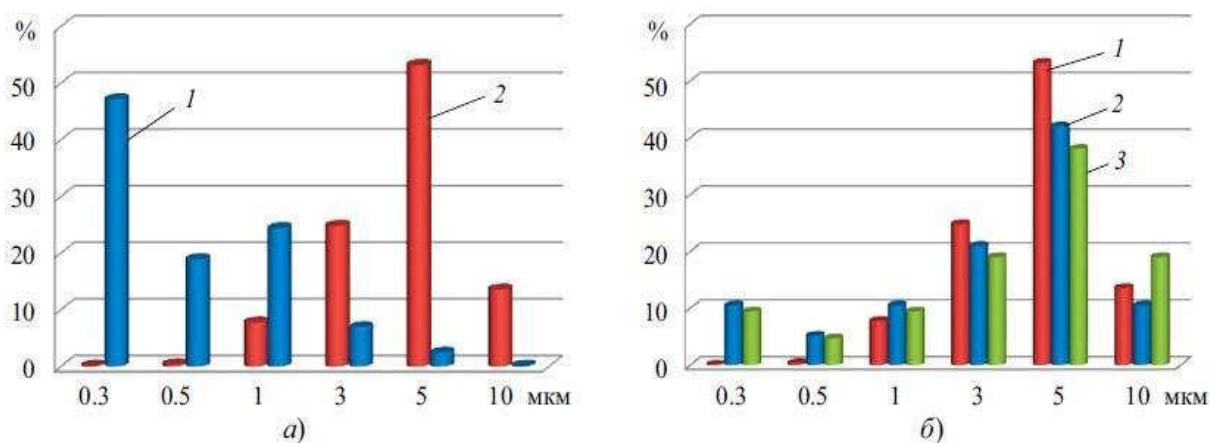


Рис.2.41. Гистограммы процентного распределения количества и концентрации частиц на всасах КВОУ по результатам замеров 13.05.2016: а – процентное распределение количества (1) и концентрации (2) частиц на центральном всасе КВОУ; б - процентная концентрация частиц в зависимости от их дисперсности. 1- центральный всас; 2-правый всас; 3- левый всас.

Как отмечалось ранее, количество мелкодисперсных частиц размером 0.3 мкм мало, по сравнению с процентным содержанием этого показателя на других всасах КВОУ (смотри рис. 2.41а). При этом концентрация частиц этого размера тоже незначительна и составляет всего 0.14%. Таким образом, влияние мелкодисперсных частиц на работу воздушных фильтров, установленных на центральном всасе КВОУ, минимально. Воздействие на работу воздушных фильтров частиц размером 5 мкм с большой концентрацией, также может считаться не существенным из-за их малого количества (2.4%). Значимыми, для эксплуатации воздушных фильтров центрального всаса КВОУ, являются частицы размеров 1-3 мкм.

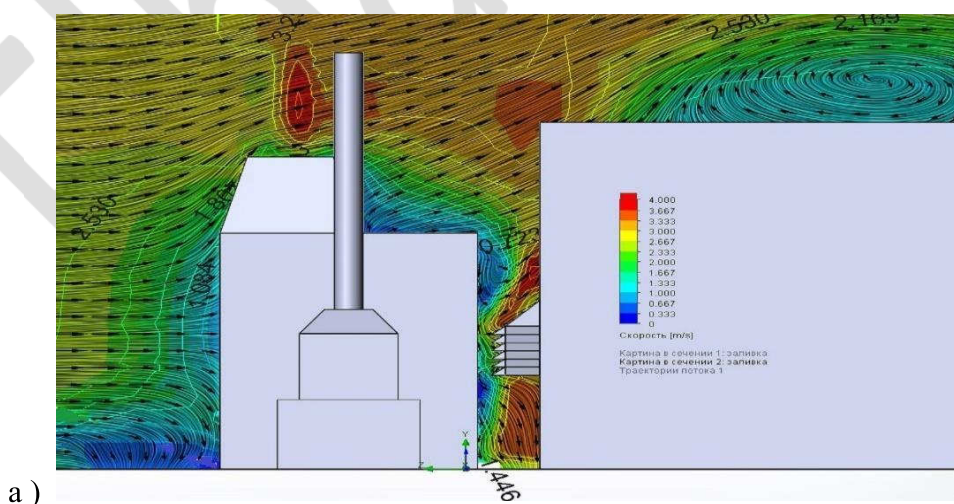
На Рисунке 2.41б, для сравнения, приведены гистограммы процентной концентрации частиц в зависимости от их дисперсности на всасах КВОУ. На всех всасах КВОУ зафиксирована наибольшая концентрация частиц размером 5 мкм, что говорит о преобладающем значении этих частиц в атмосферном воздухе ТЭЦ. Концентрация мелкодисперсных частиц размером 0.3 мкм на центральном всасе на 9.0 -10.0 % ниже, чем на других всасах КВОУ. Наибольшая концентрация крупнодисперсных частиц размером 10 мкм зафиксирована на левом всасе КВОУ. В остальных случаях, величины этого параметра на правом всасе КВОУ больше, чем на левом.

Для того, чтобы понять, почему на центральном всасе КВОУ происходит такое распределение вышерассмотренных параметров, был выполнен аэродинамический расчет натекания воздушного потока на КВОУ с помощью программы математического

моделирования SolidWorks Flow Simulation. Этот программный комплекс предназначен для моделирования трехмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также визуализации течений методами компьютерной графики. Программа SolidWorks Flow Simulation основан на конечно-объемном методе решения уравнений гидро и газодинамики, используя прямоугольную адаптивную сетку с локальным измельчением. В процессе построения математической модели, были введены граничные условия сходимости результатов и решателя. В расчете используется уравнение Навье-Стокса (закон сохранения импульса), закона неразрывности (сплошности) и уравнение SST-модели турбулентности.

На Рисунке 2.42 представлена картина обтекания воздушным потоком помещения котла утилизатора с рядом стоящими зданиями и поля скоростей на всасе КВОУ ТЭЦ-9. При достижении стены помещения КУ воздушный поток тормозится, образуя у ее основания зону завихрения с пониженной скоростью воздушного потока (смотри Рис. 2.42а). Зоны разрежения также образуются на подветренной стороне помещения котла утилизатора и рядом стоящих зданий (смотри рис. 2.42а и 2.42б). В результате обтекания зданий воздушным потоком, восточного направления, происходит трансформация поля скоростей на всасах КВОУ [22].

Как видно из эпюр и векторов скоростей, воздушный поток устремляется в зазор между зданием КУ и КВОУ со стороны территории ТЭЦ (смотри рис. 2.42б). Следовательно, скорость потока на этом левом всасе КВОУ выше, чем на остальных.



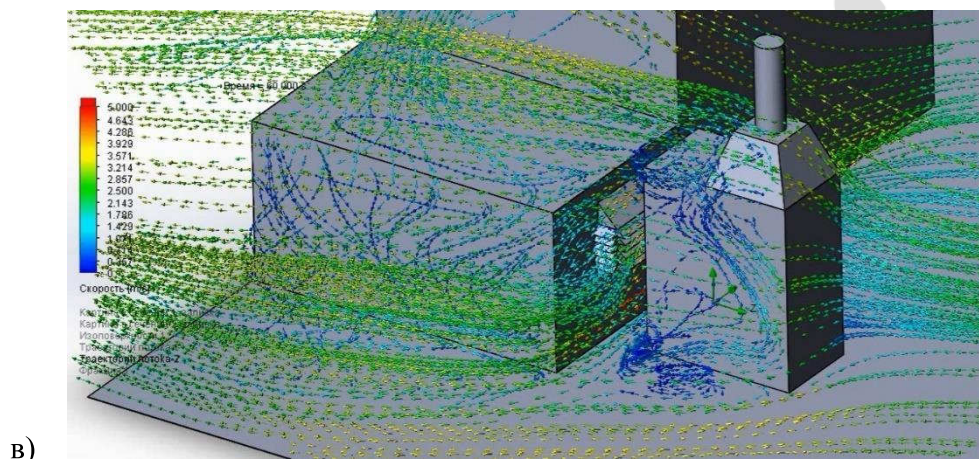
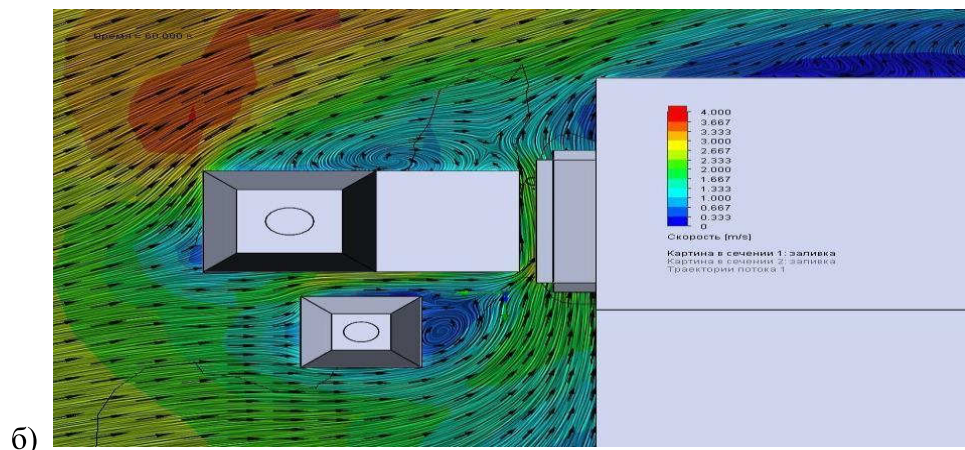


Рис. 2.42. Поле скоростей воздушного потока при обтекании помещения котла утилизатора с рядом стоящими зданиями и всаса КВОУ ТЭЦ: а - вид сбоку; б - вид сверху; в – вид сбоку в изометрии

Сравнивая результаты замеров, представленные на рис. 4.20б с значениями скоростей на рис. 2.40а и 2.40б, приходим к выводу, что расчетная аэродинамическая модель течения воздушного потока воздуха на ТЭЦ не только правильно, но и точно описывает природу явления.

На центральном всасе КВОУ, вследствие образования зон завихрения на подветренной стороне помещения КУ, скорость потока воздуха ниже, чем на других всасах. В зоны завихрения, засасывается большое количество пыли и загрязняющих веществ с крыши помещения КУ и территории ТЭЦ (смотри рис.2.40а). Под воздействием силы гравитации эти взвешенные в атмосферном воздухе вещества оседают в зазоре между зданием КУ и КВОУ, образуя устойчивые отложения.

В зимний период времени (09.01.2017), как следует из Табл. 2.8 и Рис. 2.39д, в данные зазор затягивается большое количество снега, образуя высокую концентрацию взвешенных частиц в м³ атмосферного воздуха. Процентное распределение концентрации взвешенных частиц на центральном всасе КВОУ достигало 97% по сравнению другими всасами. Аналогичная величина концентрации была зафиксированы и 13 мая 2016 года. Результаты мониторинга загрязнения атмосферного воздуха на всасх КВОУ, показывают устойчивую тенденцию образования высоких концентраций, взвешенных в атмосферном воздухе частиц в зазоре между зданием машинного зала и помещения КУ.

Картина течения воздушного потока при преобладающем направлении западного ветра согласно «розы ветров» представлена на рисунке 2.43 [22].

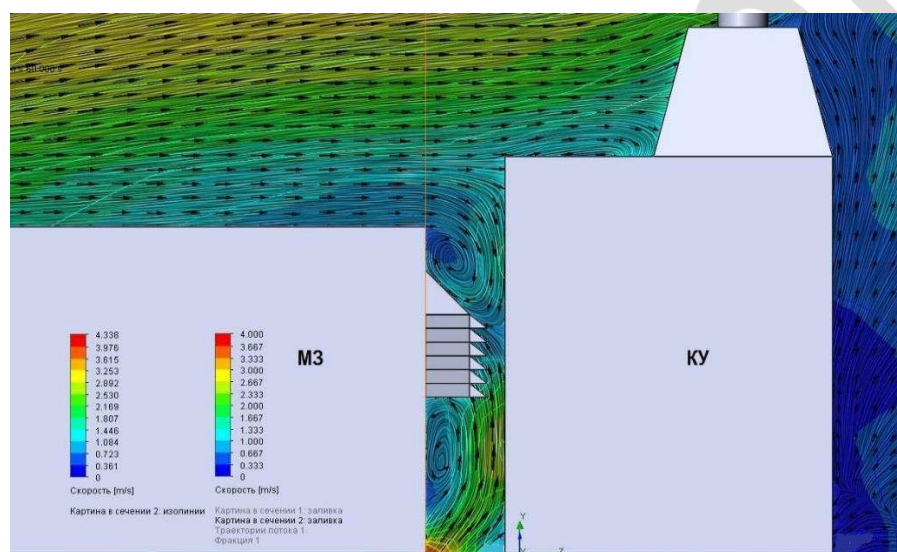


Рис.2.43. Поле скоростей воздушного потока при западном направлении ветра

Здание машинного зала ниже по высоте корпуса КУ, поэтому натекающий с западного направления поток атмосферного воздуха вступает во взаимодействие с препятствием на своем пути, в результате чего образуются завихрения воздушного потока перед всасом КВОУ. Обширная зона разрежения образуется над и под погодными козырьками воздухозаборного тракта ГТУ. Пыль и грязь, скопившиеся на крыше машинного зала, вместе с вихревым потоком засасывается компрессором ГТУ внутрь КВОУ. Вихревые потоки под КВОУ поднимают вверх скопившиеся на земле отложения, тем самым увеличивая концентрацию загрязняющих веществ в зазоре между КУ и воздухозаборным трактом ГТУ, что и было зафиксировано в процессе многолетнего мониторинга окружающей среды на ТЭЦ (смотри рис. 2.41 и 2.42а).

Кроме того, на крышу машинного зала (над воздухозабором) выведена труба эксгаустера с выпаром прямо на всас КВОУ ГТУ. К этому следует добавить, что на всасе КВОУ со стороны ТЭЦ установлен барбатер, который в процессе своей работы выбрасывает клубы пара (Рис.2.44).

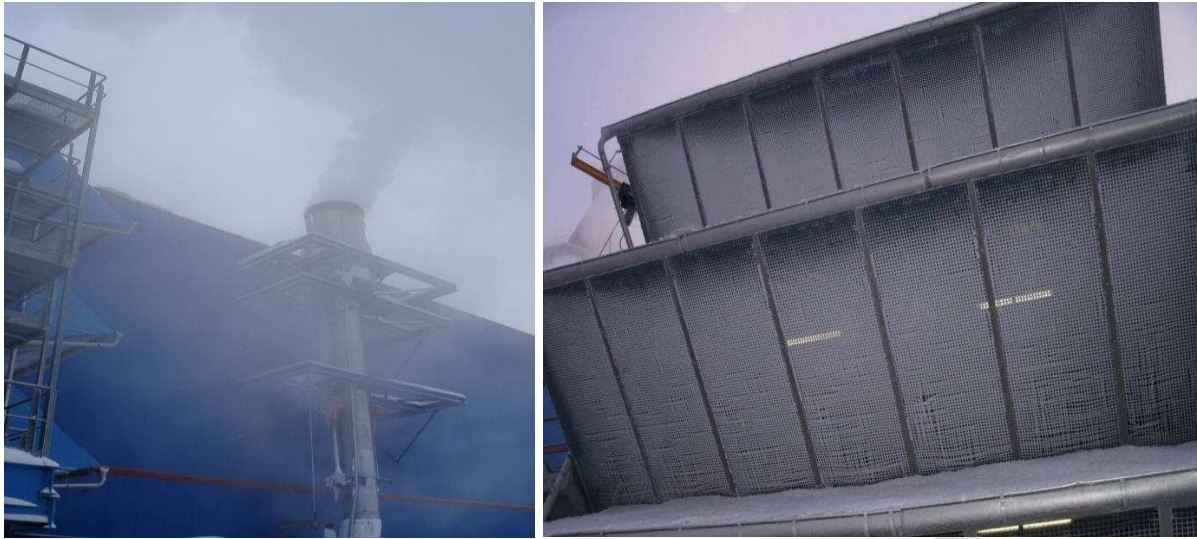


Рис. 2.44. Пар из барбатера перед всасом КВОУ ГТУ

Совокупность неудачного проектного решения по расположению воздухозаборного тракта перед стеной котла утилизатора, территориальное расположение рядом с третьим транспортным кольцом Москвы, а также недочеты размещения технического оборудования (эксгаустера и трубы барбатера) легли тяжелым бременем на работу системы очистки циклового воздуха энергетической ГТУ.

В заключении следует отметить, что по нашей рекомендации труба эксгаустера была развернута в другую сторону и ее выпары перестали поступать на всас КВОУ ГТУ.

Если трубы выпаров из различных механизмов расположены рядом с ВЗТ ГТУ, то они оказывают существенное влияние на работу системы очистки воздуха и энергоблока в целом. Ярким примером такого воздействия являлась ГРЭС в Пермском крае нашей страны, стоящая на берегу реки Яйва [24]. В зимний период времени существенное влияние на работу КВОУ ГТУ оказывают выпары из атмосферной трубы с расширительных дренажей паровой турбины. На рис.2.45а отчетливо видно, как облако влажного пара поступает на вход КВОУ, в результате чего его защитная сетка от птиц замерзает (Рис.2.45б).



а

б

Рис.2.45. КВОУ рядом с трубой выпаров: а- пар перед КВОУ; б- обмерзание защитной сетки от птиц КВОУ

Происходит дросселирование потока воздуха на всасе КВОУ, в результате чего компрессор ГТУ может перейти в нестационарный режим работы, сопровождающийся неоптимальными углами атаки воздуха на его рабочие лопатки, срывными течениями, переходящими во вращающийся срыв и помпаж. В случае с ГРЭС, при выборе места вывода атмосферной трубы с расширительных дренажей паровой турбины, не была учтена «роза ветров» (превалирующее направление ветра).

Негативное влияние влажного пара от вентиляторных градирен, поступающего на всас КВОУ ГТУ, отмечалось и на других энергетических объектах. Так на ТЭЦ, расположенной в СЗАО Москвы, в процессе эксплуатации было установлено, что в зимний период времени поступление пара с повышенной температурой на всас КВОУ вызывало снижение расчетной нагрузки ГТУ SGT5-4000F на 5-8 МВт (Рис.2.46). В результате чего, ТЭЦ была вынуждена была подавать диспетчерские заявки на снижение мощности энергоблока ПГУ по причине невозможности несения номинальной нагрузки.



Рис.2.46. Пар от вентиляторной градирни на всасе КВОУ ГТУ

Другим примером не оптимального проектного решения по размещению всаса ВЗТ энергетической ГТУ приведено на рис.2.47а. Железнодорожный вокзал с многочисленными дорожными путями и постоянным движением поездов являются рукотворными источниками дополнительного загрязнения циклового воздуха, поступающего на всас ГТУ.



а

б

Рис.2.47. Всас КВОУ ГТУ: а - ориентирован на железнодорожный вокзал; б- результаты замеров загрязненности воздуха по высоте КВОУ.

Для иллюстрации сказанного приведем пример мониторинга загрязненности воздуха, выполненного нами, на всасе КВОУ ГТУ [25]. В момент мониторинга качества воздуха на всасе КВОУ в октябре 2017 г. ГТУ находилось на техническом обслуживании. Таким

образом, влияние выбросов собственного оборудования ПГУ на фон загрязнения воздуха на всасе КВОУ отсутствовало.

На рис.2.47б приведены результаты замеров общего количества (красный цвет) и концентрации (коричневый цвет) взвешенных частиц в 1 м^3 атмосферного воздуха на всасе КВОУ по ярусам (по высоте). Синим цветом обозначены значения отношения количества мелкодисперсных частиц, %, размером от 0.3 до 0.5 мкм к общему значению. Как видно из представленных данных общее количество, концентрация и процентное отношение мелкодисперсных частиц на первом и втором ярусе КВОУ мало отличались друг от друга. В течение нескольких следующих минут выполнения мониторинга произошел скачек всех измеряемых параметров: количество частиц в 1 м^3 воздуха на всасе третьего яруса КВОУ увеличилось в 2.4 раза, а концентрация в 2.8 раза. Количество мелкодисперсных частиц, наоборот, уменьшилось на 12%. Другими словами, резко увеличилось количество крупнодисперсных частиц.

Что же произошло? Как отмечалось ранее, что всас КВОУ ориентирован на железнодорожный вокзал. Фактическое расстояние от КВОУ до границы железнодорожного вокзала составляет несколько метров. В момент взятия пробы воздуха на третьем ярусе КВОУ к границе ТЭЦ подошел и остановился пассажирский состав, над вагонами которых стоял густой дым работающих печек. В результате этого качество воздуха на всасе третьего яруса КВОУ резко изменилось. На рис.2.47 зафиксирована динамика изменения загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ до и после появления пассажирского поезда.

Данный пример наглядно показывает, как быстро может меняться качество воздуха и какое влияние на окружающую среду оказывает железнодорожный транспорт.

2.2.2. Не оптимальные проектные решения ВЗТ для энергетических ГТУ

В соответствии с «Общими техническими требованиями к системам фильтрации для энергетических газотурбинных установок» ОАО РАО «ЕЭС России» [26], разработанными при нашем участии, а также техническим заданием на проектирование, изготовление и поставку воздухозаборного тракта для энергетических ГТУ одним из требований заказчика является:

1. Комплектация КВОУ и входящие в его состав фильтры должны соответствовать климатическим условиям эксплуатации ГТУ;
2. Конструкция КВОУ должна исключать образование наледей и сосулек, попадание каких-

либо предметов в проточную часть ГТУ.

Для выполнения этих требований КВОУ могут оснащаться защитными сетками от птиц и мусора, противомоскитными сетками, погодными козырьками, анти-айсинговой (противообледенительной системой, охладительной системой воздуха в зависимости от климатических условий эксплуатации энергетической ГТУ).

На выборе и эксплуатации защитных сеток мы остановимся позже, а сейчас только отметим конструктивные просчеты установки этих экранов на всасе КВОУ, а именно на погодных козырьках.

Защитные сетки от птиц и мусора предназначены для предотвращения попадания пернатых и различных предметов в проточную часть работающих механизмов (см. рис. 2.34-2.35). Типичные металлические защитные сетки от птиц и мусора на КВОУ ГТУ имеют ячейки порядка 30x30 мм и толщину прутка 1,5-3,0 мм. Размер ячейки защитной сетки должен определяться минимальным размером наиболее часто встречающихся видов птиц в конкретном месте эксплуатации ГТУ (Рис.2.48а).

Наиболее распространенным пернатым в мире и нашей стране являются домовый воробей. Согласно данным, приведенным в [27], длина тела самца воробья составляет от 147 до 180 мм. Размах крыльев от 230 до 264 мм. Самки меньше: их длина от 125 мм до 140 мм. Таким образом, ни самец, ни самка домового воробья по своим габаритным размерам не могут проникнуть через ячейки защитной сетки.



Рис.2.48. Защитные сетки: а- от птиц и мусора; б- противомоскитная сетка

Однако, при такой установке, как изображено на рис.2.48а, в зазор между погодным козырьком и защитной сеткой может пролететь не только воробей, но и более крупные птицы.

Аналогичная ситуация, но уже с установкой противомоскитной сетки, изображена на рис.2.48б. В зазор, обозначенный красной стрелкой, пролетят не только все двукрылые насекомые перечисленные в табл.2.6, но птицы среднего размера.

Применение защитных сеток от птиц на КВОУ ГТУ предотвращает попадание пернатых в техническое оборудование и показывает гуманное отношение человека к животным, братьям нашим меньшим, которое закреплено в соответствующих правовых актах Правительства РФ.

Оснащение КВОУ погодными козырьками энергетической ГТУ должно осуществляться исходя из статистических данных атмосферных осадков в виде дождя и снега, данных о снеговой нагрузке и скорости ветра для конкретной климатической зоны. На рис.2.49 представлены фото КВОУ ГТУ Кавасаки в г. Кайзерслаутерн на юго- западе земли Рейланд-Пфальц (ФРГ) и на ТЭЦ в г. Тюмень на юге Западной Сибири РФ.



Рис.2.49. КВОУ ГТУ без погодных козырьков: а- в Кайзерслаутерне; б- в Тюмени.

Если поставку КВОУ без погодных козырьков в Кайзерслаутерн можно обосновать мягкими климатическими условиями на юго- западе земли Рейланд-Пфальц, то применение КВОУ аналогичного дизайна в Западной Сибири с низкими температурами и обильными снегопадами, объяснению не подлежит. Налицо грубая ошибка проектантов и изготовителей КВОУ, вызванная не учетом климатических условий Тюменской области.

В результате этой ошибки в систему очистки циклового воздуха КВОУ ГТУ поступают атмосферные осадки в виде дождя и снега, образуются сосульки, что не соответствует «Общим техническим требованиям к системам фильтрации для энергетических газотурбинных установок» ОАО РАО «ЕЭС России» (Рис.2.50).



Рис.2.50. Снег и лед в фильтре первой ступени КВОУ ГТУ ТЭЦ г. Тюмень

Обмерзание защитных сеток от птиц вызвано, занос снегом воздушных фильтров КВОУ энергетических ГТУ обусловлено не только близким расположением башенных и вентиляторных градирен, но и **неудовлетворительной работой противобледенительной (антиайсинговой) системы.**

Наибольшее распространение в электроэнергетике нашли две системы анти-айсинга: отбор горячего воздуха из-за одной из последних ступеней компрессора ГТУ и подачей его на всас КВОУ и установка теплообменных аппаратов перед фильтрами ГТУ (Рис.2.51).

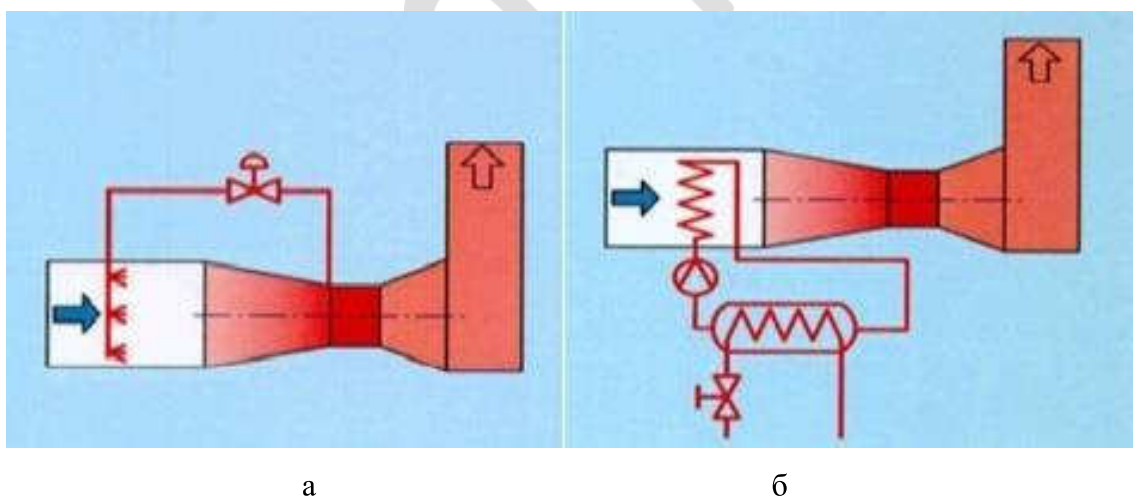


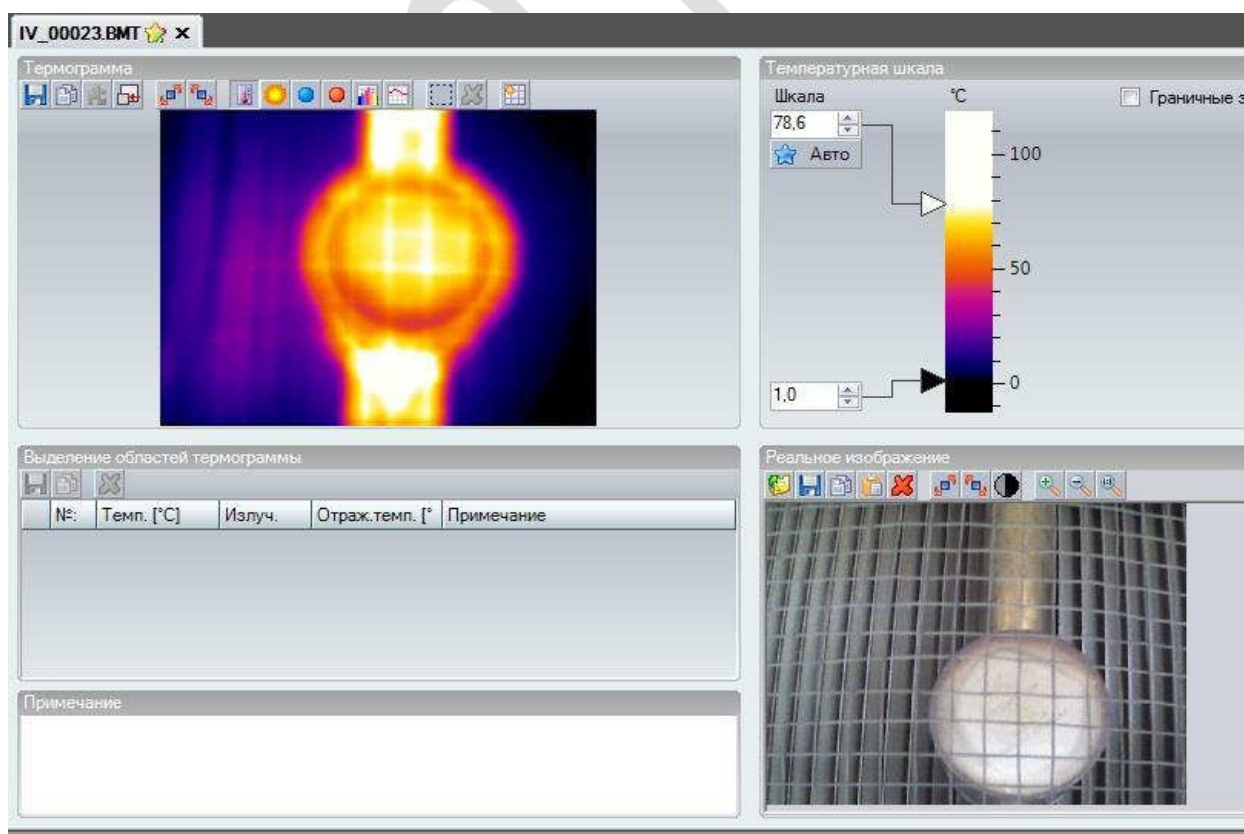
Рис.2.51. Рисунок 2.64. Принципиальные схемы АОС: а- подача горячего воздуха из последних ступеней компрессора ГТУ; б – нагрев атмосферного воздуха в теплообменном аппарате.

Распыл горячего воздуха на всасе КВОУ осуществляется через боковые поверхности форсунок на 360° . Для равномерного нагрева всех воздушных фильтров КВОУ, форсунки распыла устанавливаются в шахматном порядке (Рис.2.52).

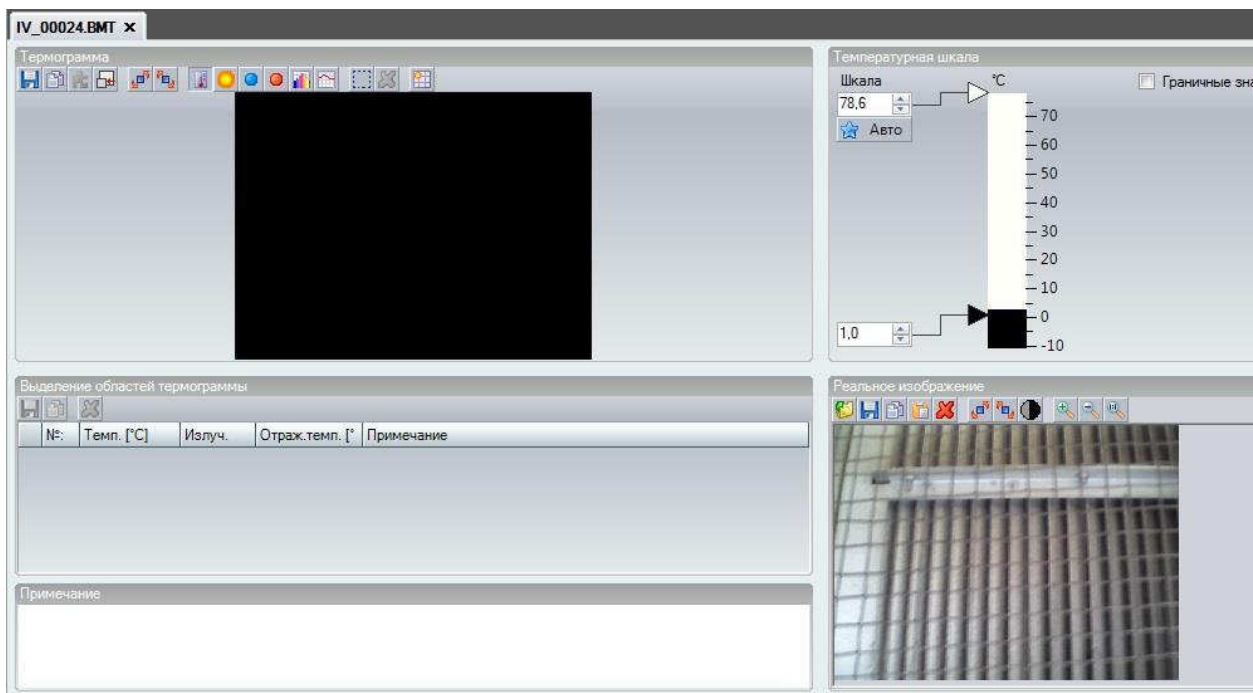


Рис.2.52. Расположение форсунок распыла системы антиайсинга на КВОУ ГТУ

Однако, как показал опыт эксплуатации этой системы антиайсинга равномерного обогрева всей фронтальной площади фильтров КВОУ. воздушных фильтров не достигается. На рис.2.53а показана термограмма поля температур, создаваемого в результате распыла горячего воздуха форсункой антиайсинга перед фильтрами КВОУ. На рис.2.53б представлена термограмма на расстоянии 600 мм (размер одного фильтра) от форсунки распыла. На этом расстоянии обогрева воздушных фильтров не зафиксировано.



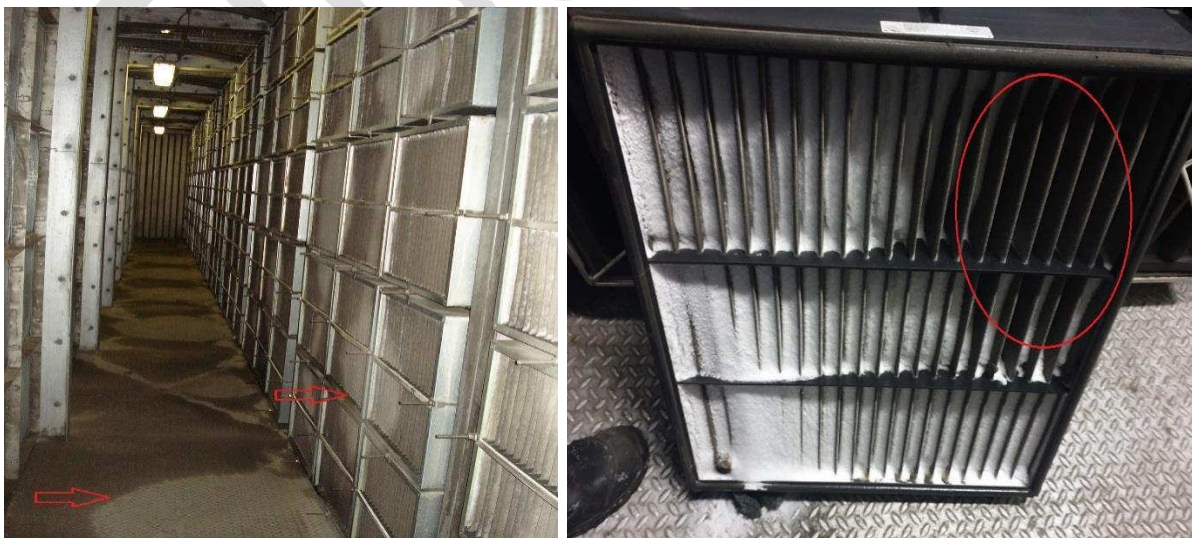
а



б

Рис.2.53. Термограммы поля температур при работающем анти-айсинге КВОУ ГТУ:
а- у форсунки распыла; б- на расстоянии 600 мм от форсунки распыла.

На рис.2.54 отчетливо видны светлые пятна нагретой поверхности части сервисной дорожки и воздушных фильтров КВОУ ГТУ. Остальные части воздушных фильтров мокрые или занесены снегом, что увеличивает перепад давления на них, который приводит к снижению выработки электроэнергии ГТУ.



а

б

Рис.2.54. Результат работы АОС с распылом горячего воздуха в шахматном порядке:
а – воздушные фильтры мокрые; б- воздушные фильтры занесены снегом.

Для оптимальной работы фильтров (на расчетных значениях расхода воздуха и скоростей) в системе очистки циклового воздуха ГТУ важно знать **распределение скоростей воздуха на всасе КВОУ по его высоте**. С этой целью были выполнены замеры скорости воздуха по высоте КВОУ разного дизайна воздухозаборных трактов. Кроме того, осуществлен аэродинамического расчета течения воздушного потока в одном из таких КВОУ и горизонтальном воздуховоде с помощью программы математического моделирования SolidWorks Flow Simulation. Результаты выполненных замеров скорости воздушного потока на всасе действующей ВЗТ энергетических ГТУ и аэродинамического расчета показали свою идентичность и точность (Рис.2.55).

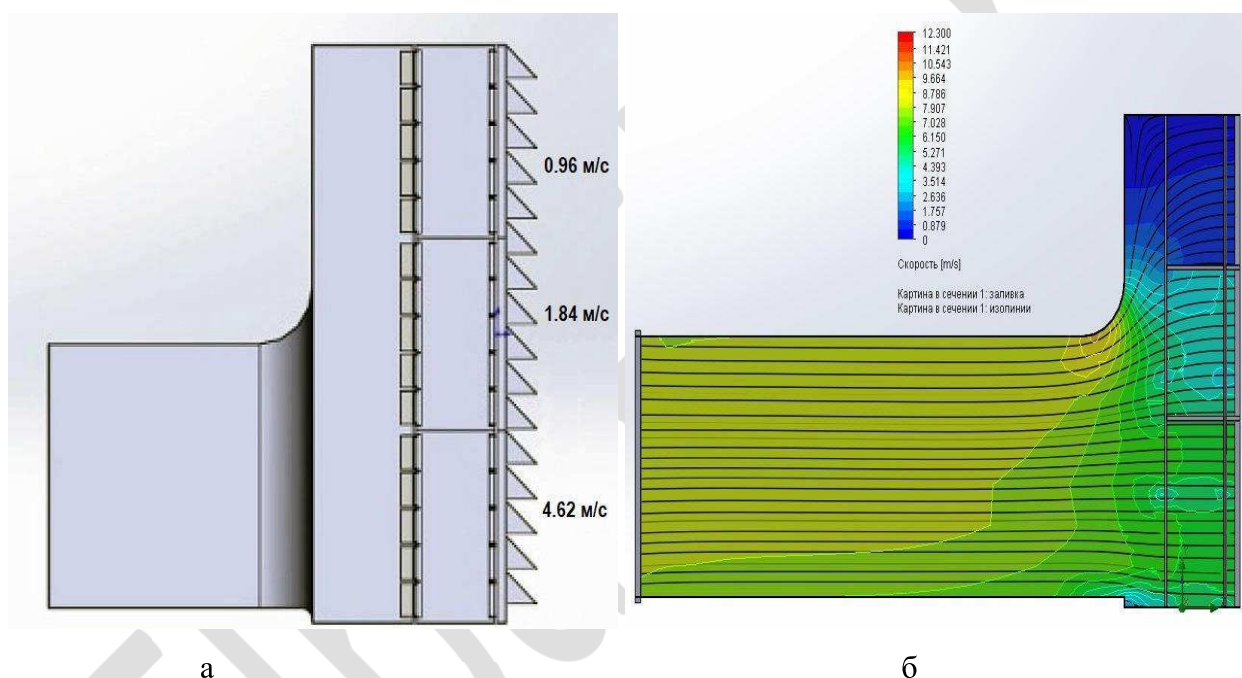


Рис.2.55. Скорость потока воздуха на всасе КВОУ: а- замеры; б-расчет.

Уменьшение скорости потока по высоте КВОУ, обусловлено неоптимальной конструкцией воздухозаборного тракта ГТУ. При совпадении оси установки фильтров нижнего яруса и горизонтальной части воздуховода, скорость потока на всасе КВОУ выше, чем на других ярусах, где соосность отсутствует. В результате чего, скорость потока на нижнем ярусе в 4.8 раза превышает этот параметр на верхнем ярусе КВОУ ГТУ. Не оптимальные скорости воздушного потока приводят к росту перепада давления на фильтрах, неэффективной очистки атмосферного воздуха, сокращению жизненного цикла фильтр -элементов и финансовым затратам на их закупку. Такая конструкция ВЗТ ГТУ, инициирует неравномерное распределение объема засасываемого атмосферного воздуха по ярусам КВОУ и, следовательно, разную пылевую нагрузку на фильтры.

Опираясь на результаты выполненных замеров и аэродинамических расчетов проанализируем схемы течения воздушного потока в существующих КВОУ энергетических ГТУ с точки зрения оптимальной работы очистки системы фильтрации воздуха. Дадим обозначение этим типам КВОУ в зависимости от расположения за ними воздуховода - А, Б, В (Рис.2.56, 2.58, 2.59). На Рис.2.57 представлены обозначения векторов скоростей и углов поворота потока, эпюра скоростей по высоте КВОУ ГТУ.

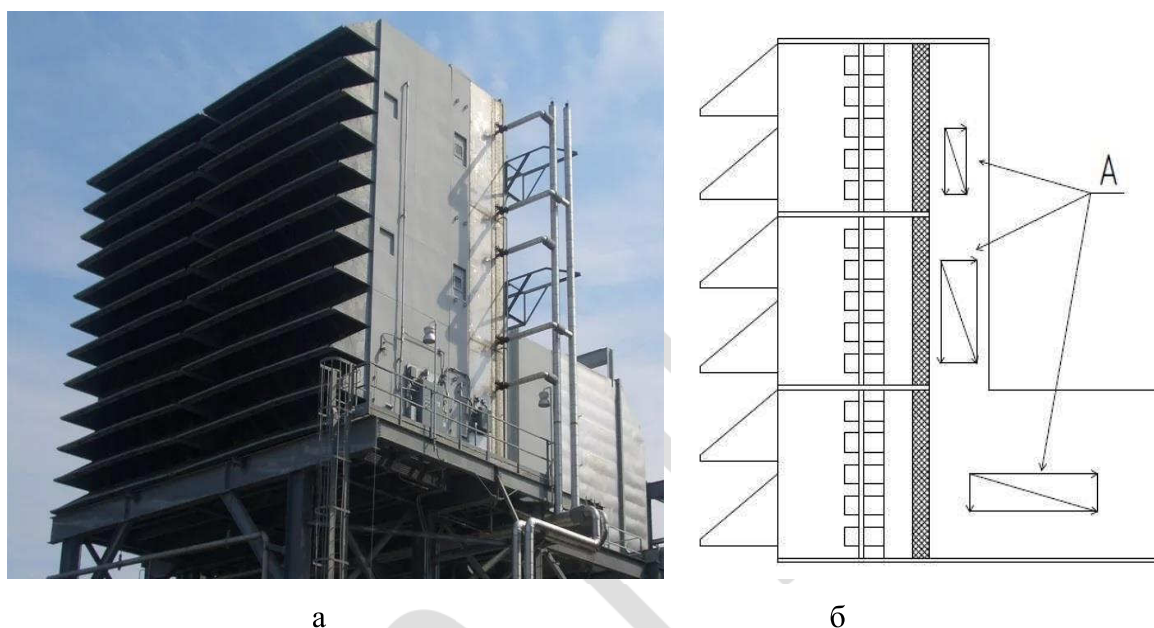


Рис.2.56. «КВОУ А»: а- горизонтальный воздуховод на уровне нижнего яруса КВОУ (<https://clck.ru/33Ytqi>); б- схема КВОУ А с треугольниками скоростей после фильтров



Рис.2.57. Обозначения векторов скоростей и углов поворота потока, эпюра скоростей по высоте КВОУ ГТУ

Из представленных данных видно, что скорости потока за фильтрами «КВОУ А и Б» на верхних ярусах имеют наименьшую осевую составляющую скорости, по сравнению с другими ярусами, а угол поворота потока (вектор результирующей скорости) в воздуховоде, также наибольший, более 71 градуса. Согласно законов аэродинамики, такие

большие углы поворота потока инициируют вихревые потоки и повышенные потери давления в воздуховоде.

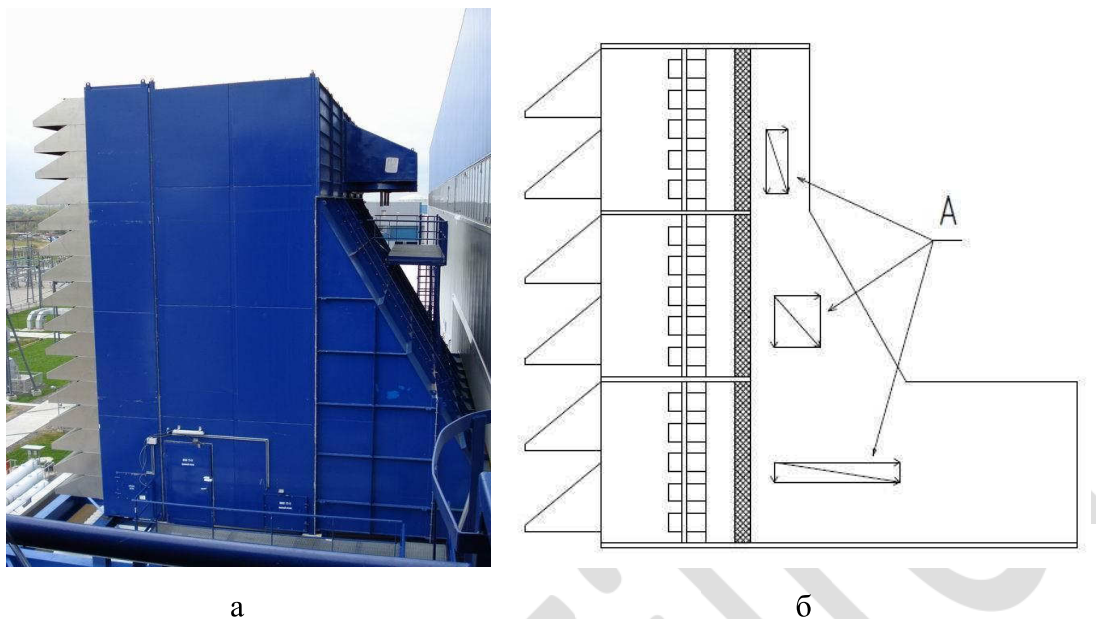


Рис.2.58. «КВОУ Б»: а- воздуховод на уровне среднего яруса КВОУ; б- б- схема КВОУ Б с треугольниками скоростей после фильтров

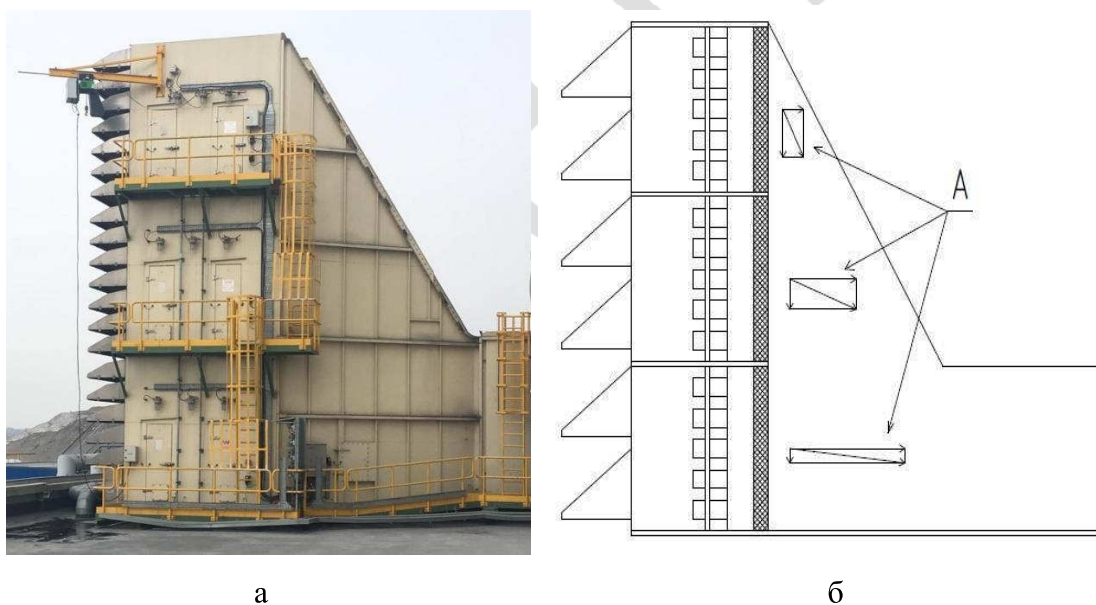


Рис.2.59. «КВОУ В»: а- воздуховод на уровне верхнего яруса КВОУ; б- схема КВОУ В с треугольниками скоростей после фильтров

Радиальные составляющие скоростей в вертикальном канале больше осевых. Это объясняется эжекторным эффектом, когда происходит передача кинетической энергии от воздушного потока, движущейся с большей скоростью в горизонтальном воздуховоде,

потоку в вертикальном канале. Эжектор, работая по закону Бернулли, создаёт в сужающемся сечении пониженное давление одного потока, что вызывает подсос в этот поток воздуха в вертикальном канале, который затем уносится от места всаса энергией первого потока.

При более плавном (не под 90^0) переходе от «КВОУ Б» к воздуховоду ГТУ на верхних ярусах, картина течения воздушного потока за фильтрами меняется: осевые скорости возрастают, угол поворота потока результирующего вектора скорости на 24^0 меньше, чем на «КВОУ А» на втором ярусе, а, следовательно, меньше и потери.

Из сказанного следует, что чем выше КВОУ и чем ниже расположен воздуховод к ГТУ, тем большие потери возникают в воздухозаборном тракте и тем меньше скорости потока на всасе верхних ярусов. Из рассмотренных схем только «КВОУ В» обеспечивает более равномерное распределение скорости воздушного потока по высоте на всасе ВЗТ.

Все сказанное корректно при условии одинаковых климатических условиях для рассмотренных КВОУ ГТУ.

Таким образом мы выяснили, как конструктивные решения КВОУ и воздуховода влияют на скорости потока на входе в воздушные фильтры. Повышенные, не оптимальные, с точки зрения расчетных (проектных), скорости воздушного потока на входе в воздушные фильтры, приносят с собой большое количество загрязняющих веществ, что негативно сказывается на их жизненном цикле. Рост перепада давления на фильтрах нижних ярусов может достичь предельно-допустимых значений, в то время, как фильтры, верхних ярусов КВОУ будут недогружены. Другими словами, по высоте КВОУ ГТУ возникает неравномерная загрузка фильтров пылью с разными перепадами давления. Определить какие по высоте КВОУ фильтры пришла пора менять, а какие нет, трудно выполнимая задача, поскольку датчики перепада давления за фильтрами устанавливаются только на одном ярусе КВОУ ГТУ. Таким образом, по показаниям одного датчика на ступени фильтрации воздуха, меняются все фильтр-элементы КВОУ ГТУ, что ни с технической и экономической точки зрения не целесообразно.

Не оптимальная система мониторинга перепада давления на фильтрах в системе очистки воздуха является еще одним конструктивным недостатком современных КВОУ энергетических ГТУ.

Приведен характерный пример. Известно, что в процессе эксплуатации КВОУ ГТУ не редки случаи выпадения фильтров из мест их установки. Это обусловлено ненадежным закреплением фильтр- элементов, повреждением крепежа, чрезмерным наполнением их пылью или атмосферной влагой. Существенного влияния на показания датчиков давления такие инциденты обычно не оказывают. Однако, ситуация, приведенная на рис.2.60,

кардинально отличается от перечисленных выше. Выпавший из первой ступени очистки КВОУ карманный фильтр- коагулятор, дросселировал входное сечение фильтра второй ступени и, установленный за ним фильтр тонкой очистки в фильтр боксе. В это же фильтр боксе установлены приемные устройства датчиков фиксирующий перепад давления на фильтрах в КВОУ. В результате чего произошел резкий скачек давления на второй и третьей ступени фильтрации циклового воздуха ГТУ и на всем КВОУ. Оператор на блочном щите управления ГТУ с помощью автоматизированной системы управления (АСУ ТП) получил сигнал о превышении предельно-допустимого перепада давления в КВОУ ГТУ. Какие действия должны последовать с его стороны в этом случае: снижение мощности ГТУ, останов ГТУ, с последующим обесточивание промышленных объектов и жилых домов? И это все из-за одного выпавшего фильтра.

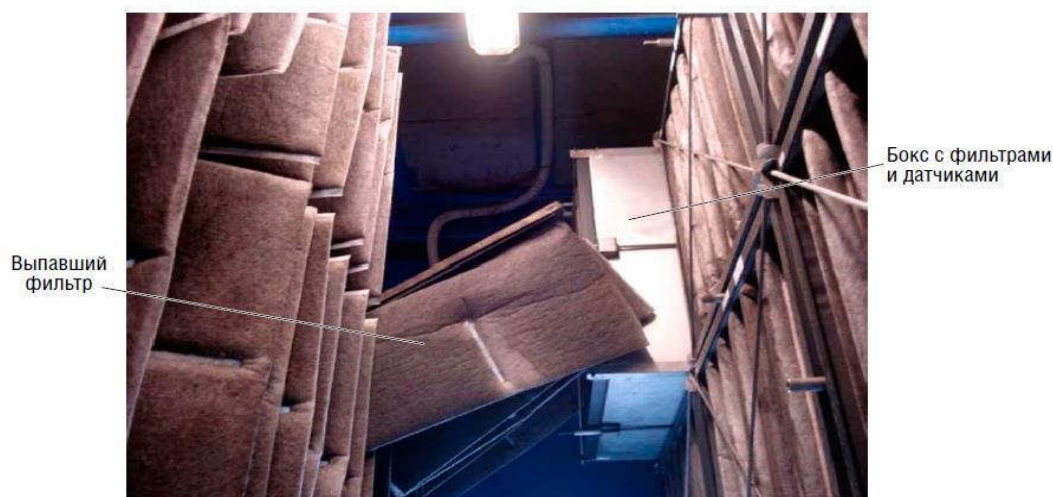


Рис. 2.60. Выпадение фильтра коагулятора и дросселирование им фильтров второй и третьей ступени очистки циклового воздуха ГТУ

Из приведенных примеров становится очевидно, что использование только штатных датчиков давления, поставляемых вместе с КВОУ, недостаточно для осуществления качественного мониторинга загрязненности фильтров по перепаду давления и надежной работы энергетической ГТУ.

2.2.3. Человеческий фактор, влияющий на эффективность очистки воздуха ГТУ

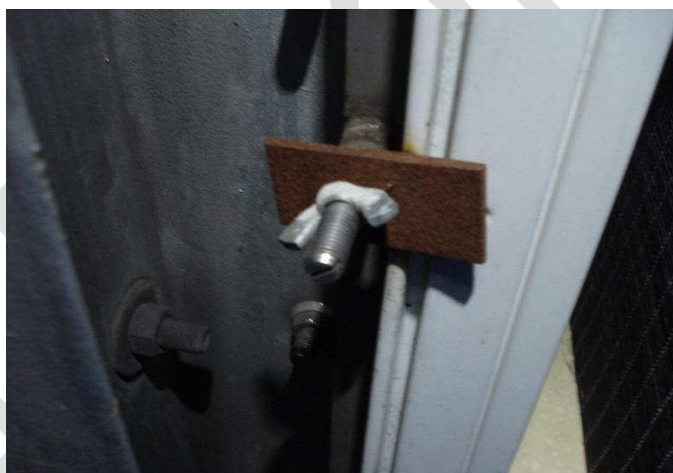
Персонал ТЭЦ, обслуживающий блоки ПГУ, должен постоянно следить за состоянием системы фильтрации циклового воздуха ГТУ и исправностью ВЗТ. Ниже приведены примеры типичных недостатков обслуживания персоналом электростанций этого оборудования.



Рис.2.61. Не снятые с КВОУ ГТУ противомоскитные сетки на зиму



а



б

Рис.2.62. Крепление фильтров в КВОУ ржавыми фиксаторами: а- фильтр грубой очистки; б- фильтр тонко очистки класса Е11

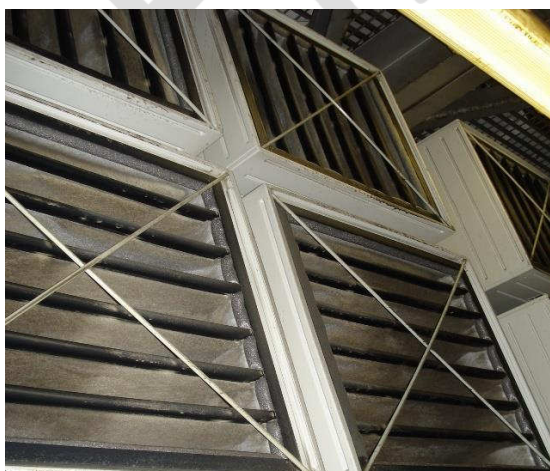


Рис.2.63. Неправильная установка фильтров в КВОУ ГТУ



а

б

Рис.2.64. Отсутствие герметичности дверей КВОУ: а- уплотнение отсутствует; б- отсутствует часть уплотнения.



Рис.2.65. Подсос грязного воздуха из машинного зала в воздуховод к ГТУ



Рис.2.66. Маслянистые отложения на чистой стороне КВОУ ГТУ

Резюме:

Все рассмотренные факторы оказывают существенное влияние, как на эксплуатацию и жизненный цикл воздушных фильтров КВОУ, так и на технико-экономические показатели энергетических ГТУ. И когда при очередном осмотре осевого компрессора ГТУ фиксируется такое состояние лопаток ВНА, как показано на рис.2.67, мы должны понимать, что не надо во всех бедах винить только фильтры, а надо проанализировать все возможные причины проникновения загрязнений в проточную часть турбомашин.



Рис.2.67. Загрязненное состояние лопаток ВНА ГТУ

Хотелось бы надеяться, что изложенные в этой главе факты дадут пищу для размышления проектным организациям основным профилем, которых являются энергетические объекты нашей страны. Проектанты и эксплуатанты ВЗТ энергетических ГТУ, с учетом поднятых авторами проблем, смогут улучшить конструкцию своего оборудования и его эксплуатацию.

Кто-то когда-то назвал фильтры и КВОУ вспомогательным оборудованием для ГТУ. Да, **оно вспомогательное, но не второстепенное.** Без воздушных фильтров и КВОУ невозможно обеспечить надежную и эффективную работу энергетической ГТУ. Эта такая же потребность, как и у человека дышать чистым воздухом.

Каждый хочет, чтобы правда была на его стороне,
Но не каждый хочет быть на стороне правды
Ричард Уэйтли

Глава 3. Системы фильтрации циклового воздуха ГТУ

Выбор системы фильтрации циклового воздуха ГТУ, согласно «Общих технических требований к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок» РАО ЕЭС России [1], должен осуществляться исходя из климатических условий, в которых будет эксплуатироваться электростанция. В документе также приведена таблица рекомендаций по комплектации КВОУ для энергетических ГТУ используемых на объектах РАО ЕЭС. Исходя из этих рекомендаций на территории России повсеместно необходимо использование статической системы фильтрации КВОУ, за исключением районов пустынь, где целесообразно применением импульсной системы фильтрации воздуха.

3.1. Импульсные системы очистки воздуха энергетических ГТУ

Воздушные фильтры с импульсной очисткой были разработаны после случаев остановки оборудования, в связи с резким повышением перепада давления на статических фильтрующих системах из-за полного их блокирования песком во время песчаных бурь в районах Ближнего Востока (Рис.3.1.).



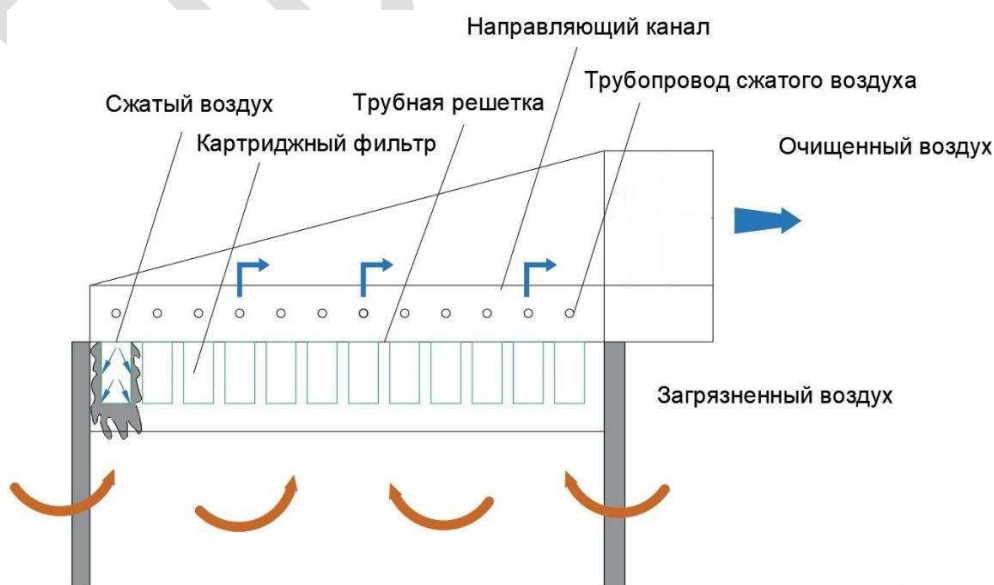
Рис.3.1. Карманный фильтр заблокирован песком (Ирак) [2]

На рис.3.2 зафиксировано состояние окружающей среды в одном и том же месте Кувейта при обычных климатических условиях и во время песчаной бури [3].



Рис. 3.2. Кувейт: а- в обычную погоду; б- во время песчаной бури

Во время песчаных бурь концентрация пыли в воздухе достигает 500 мг/м^3 и выше. В таких климатических условиях фильтры импульсного типа работают достаточно хорошо. На Рис.3.3 изображена типовые схемы и принцип работы КВОУ ГТУ с фильтрами импульсной очистки с вертикальным (Рис.3.3а) и горизонтальным (Рис.3.3б) забором воздуха. В процессе работы ГТУ, атмосферный воздух всасывает либо снизу КВОУ, либо через погодные козырьки, проходит очистку в фильтровальном отделении КВОУ (импульсные фильтры) и через воздухопровод поступает на вход осевого компрессора



а

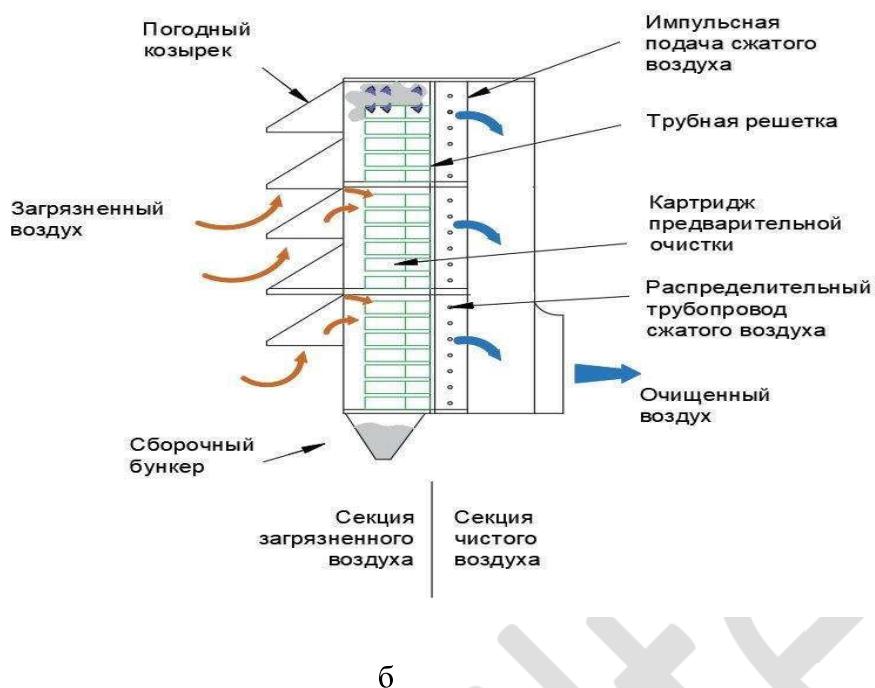


Рис. 3.3. КВОУ ГТУ с фильтрами импульсной очистки: а - с вертикальным забором воздуха; б- с осевым забором воздуха.

По мере загрязнения фильтров пылью и песком они очищаются обратным импульсом сжатого воздуха, подаваемого через форсунки от отдельно стоящего компрессора. Пыль и песок под действием гравитационной силы через хоппер поступают в специальные емкости для их сбора.

В других условиях, невысокой запыленности окружающей среды, особенно при наличии в воздухе несгоревших углеводородов, морской соли, работа фильтров данного типа не может считаться удовлетворительной (Рис.3.4а). На рисунке 3.4б зафиксирован эрозийный износ лопаток осевого компрессора ГТУ Siemens V94.2А в Омане при использовании в системе фильтрации воздуха КВОУ импульсных фильтров [3].



а

б

Рис.3.4. ГТУ V94.2А: а- импульсные фильтры; б- эрозийный износ лопаток компрессора

До появления общих технических требований к системам фильтрации воздуха энергетических газотурбинных установок РАО ЕЭС России в 2007 году на ряде отечественных ТЭС и ТЭЦ уже были установлены импульсные системы очистки циклового воздуха ГТУ. Анализ эксплуатации КВОУ энергетических ГТУ с импульсной системой очистки воздуха на отечественных ТЭС и ГРЭС подробно изложен в работах [3,4,6].

В 1998 году импульсная система очистки воздуха для ГТУ GT8С мощностью 50 МВт была установлена в городе Санкт -Петербурге на Южной ТЭЦ. Поставщиком оборудования являлась компания АВВ (ASEA BROW BOVER). При расходе воздуха ГТУ равного 183 кг/сек, КВОУ было оснащено 192 коническими Р19-1281 и цилиндрическими Р19-1280 фильтрами компании Donaldson (США) (Рис.3.5).



Рис.3.5. Импульсные фильтры



Рис.3.6. КВОУ Сочинской ТЭС

Для подачи сжатого воздуха в систему импульсной очистки (для продувки фильтров), КВОУ было оборудовано отдельностоящим компрессором фирмы Atlas Copco [3]. За время эксплуатации наработка ГТУ составила порядка 2000 часов. При этом энергетическая установка эксплуатировалась только в зимний период времени, когда пылесодержание воздуха значительно ниже среднегодового уровня. Из-за неэффективности работы системы очистки воздуха при низкой запыленности и высокой влажности окружающей среды, а также падения выработки мощности GT8С из-за загрязнения проточной части компрессора, ГТУ перестала эксплуатироваться и находилась в резерве в течении нескольких лет. В последствии ГТУ GT8С была демонтирована.

22 декабря 2004 года в опытно-промышленную эксплуатацию были запущены два энергоблока Сочинской ТЭС. В состав этих энергоблоков входят ГТУ GT-10С (Siemens) мощностью 28.3 МВт. ГТУ оснащены КВОУ с двусторонним всасом атмосферного воздуха и импульсной системой очистки фильтров (Рис. 3.6). В табл.3.1 представлены данные о системе фильтрации воздуха ГТУ GT-10С [4].

Табл.3.1. Технические характеристики системы очистки воздуха ГТУ GT-10C

№пп	Наименование характеристики	Значение характеристики
1.	Модель ГТУ	GT-10C (Siemens)
2.	Расход воздуха через КВОУ	90 кг/с
3.	Количество пар фильтрэлементов	112
4.	Начальное сопротивление воздушного потока	30 мм вод.ст.
5.	Расчетное стабилизированное падение давления	90 мм вод.ст.
6.	Тип фильтрующего элемента	P78-3302-604508 (цилиндрический) P78-3301-604508 (конический) Donaldson
7.	Класс фильтрации	F9
8.	Интервал между импульсами	32 с
9.	Длительность импульса	0,1 с
10.	Количество ступеней фильтрации	одна - импульсная
11.	Количество пылевых вентиляторов	4
12.	Потребляемая электрическая мощность пылевого вентилятора	0,75 кВт

Воздушные импульсные фильтры размещены в КВОУ на высоте 8-11 м над уровнем земли. Выполненные нами замеры загрязненности воздуха на всасе всех КВОУ показали, что 97% всех частиц, находящихся в атмосферном воздухе, имеют размер 0,3-0,5 мкм, а частицы размером более 10 мкм составляет 0.2-0.3%. В публикации [5] Ф. Маскрофт, анализируя типичное расположение КВОУ энергетических ГТУ над генератором на высоте около 10 м, утверждает, что в фильтры практически никогда не поступают крупные частицы размером более 10 мкм. Даже при пыльных бурях содержание крупных частиц в воздухе на высоте 8 м составляет всего 5% от количества таких частиц на высоте 3м. В нормальных условиях крупные частицы крайне редко достигают высоты более 8 м. В заключении делается вывод, что применение импульсных фильтров для таких ГТУ нецелесообразно.

Пример Сочинской ТЭС является полным аналогом, описанной Ф. Маскрофтом ситуации с фильтрами, размещенными на высоте 8-11 м. Выполненный нами мониторинг загрязненности воздуха на КВОУ этой ТЭС полностью подтверждает сделанный вывод.

При очистке импульсных фильтров крупнодисперсные (тяжелые) частицы легко сбрасываются с поверхности фильтровального материала. Но, если в состав атмосферного воздуха входит значительное количество мелких частиц, которые глубоко проникают в фильтровальный материал, то очистить их обратный импульсом удастся редко. Ситуация усугубляется, когда такие фильтры работают при высокой влажности, снеге и обледенении.

Поставка КВОУ для Сочинской ТЭС произведена без устройства по предупреждению налипания снега на входном диффузоре (козырек рециркуляции горячего воздуха) (см. рис.3.6). Как показали события нескольких зим (сильнейшие снегопады и

обледенение, приведшие к нарушению энергоснабжения Сочи), такое конструктивное решение не является оптимальным.

В целях увеличения продолжительности безотказной работы КВОУ и продления срока службы, персоналом Сочинской ТЭС проводились регулярные очистки фильтров промышленным пылесосом (1 раз в 2 месяца). Работы совмещаются с промывкой проточной части компрессора, которая осуществляется ежемесячно.

Города Санкт - Петербург и Сочи являются приморскими городами, атмосферный воздух которых, характеризуется повышенной влажностью и большим содержанием морской соли. Трудно предположить из каких соображений был сделан выбор в пользу импульсных фильтров из прессованной целлюлозно - синтетической смеси для очистки циклового воздуха ГТУ ТЭЦ, работающих в прибрежных (onshore) зонах.

31 октября 2013 г. в строй была введена Джубгинская ТЭС, которая была построена в соответствии с «Программой строительства олимпийских объектов и развития города Сочи как горноклиматического курорта», утвержденной Постановлением Правительства РФ от 29 декабря 2007 г. № 991. Установленная электрической мощностью станции составляет 198 МВт. Станция оборудована двумя ГТУ LMS 100 PB производства GENERAL ELECTRIC. На рис.3.7 изображено КВОУ ГТУ с импульсными фильтрами, одним из поставщиков которых являлась компании Микропор (Турция -ТКУ).

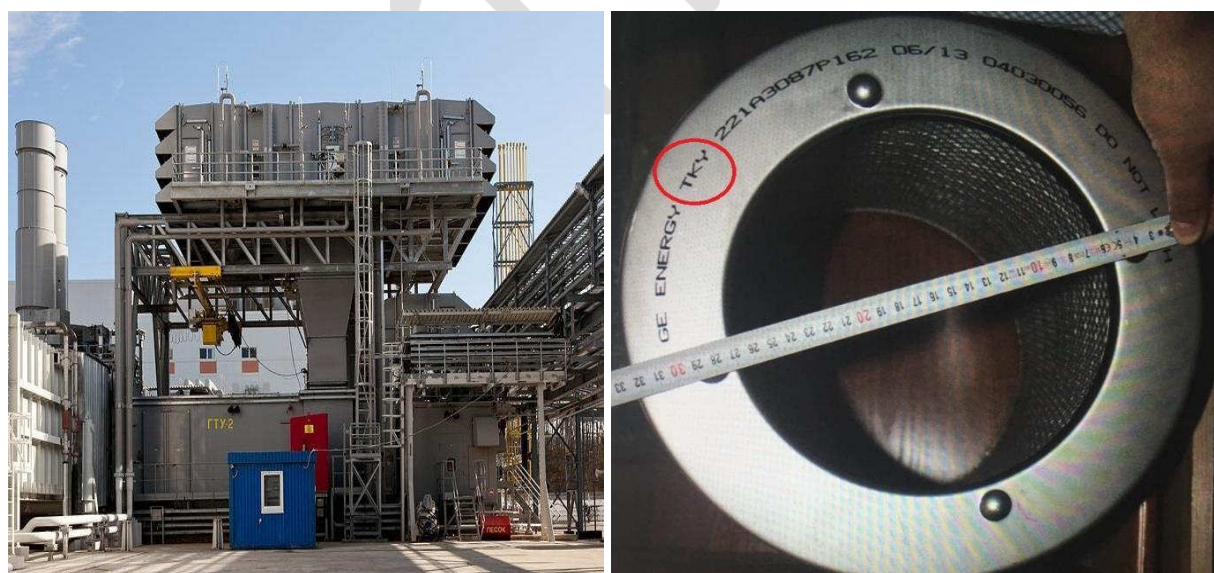


Рис.3.7. КВОУ ГТУ LMS 100 PB Джубгинской ТЭС (<https://clck.ru/33anno>)

В отличие от КВОУ Сочинской ТЭС, здесь КВОУ оснащено погодными козырьками и фильтры изготовлены из стекловолкна. Это говорит о том, что при подготовке проекта Джубгинской ТЭС были учтены недостатки системы фильтрации и КВОУ Сочинской ТЭС.

В таблице 3.2 приведены технические характеристики воздушных импульсных фильтров, установленных на Джубгинской ТЭС.

Табл.3.2. Технические характеристики воздушных импульсных фильтров



Наименование параметра	Значение	Примечание
Номинальный расход воздуха	2500 м ³ /ч	-
Класс фильтрации	F9	В соответствии с EN779-2012
Сопrotивление фильтра: - начальное - конечное	193 Па 450 Па	-
Эффективная площадь фильтрации	42,6 м ²	-
Эффективность фильтра на частицах 0,4 мкм: - начальная - средняя	89% 97,0%	В соответствии с EN779-2012
Способность к пылеудержанию	99,99%	В соответствии с EN779-2012
Фильтрующий материал	стекловолокно	
Пылеемкость	1893 г	-
Габаритные размеры фильтра включая p-ры уплотнения: - высота - высота уплотнения - наружный диаметр - конус диаметр	1350 мм 14 мм 324 мм 444 мм	-
Уплотнение фильтра	Кольцевое уплотнение из полиуретана	-
Наличие защитной сетки	да	Обеспечивает безопасную эксплуатацию системы фильтрации КВОУ ГТУ
Конструктивные элементы фильтра	оцинкованная сталь	-

В состав другой энергетической компании входят две ГРЭС с ПГУ, на которых установлены КВОУ с импульсной системой очистки циклового воздуха ГТУ PG 935FA GE Energy: Сургутская и Шатурская [6].

Известно, что такие характеристики внешних условий, как температура и влажность окружающей среды, “роза ветров” и скорость ветра, концентрация пыли, содержащейся в атмосферном воздухе, и ее дисперсный состав, оказывают определяющее влияние на эффективность работы воздушных фильтров ГТУ.

Сургутская ГРЭС-2 географически находится в городе Сургут Ханты-Мансийского автономного округа Тюменской области в центральной части Западно - Сибирской равнины, в среднем Приобье. Климат района резко континентальный и характеризуется суровой продолжительной зимой и коротким относительно теплым летом

Энергоблок ПГУ-800 расположен на водораздельном склоне рек Оби и Черная, в долине реки Черная у водохранилища. Это расположение обуславливает повышенную влажность воздуха от испарения, как в летний, так и в зимние периоды времени из-за подогрева воды водохранилища Сургутской ГРЭС-2.

Шатурская ГРЭС располагается в городе Шатура Московской области, в пределах Мещерской низменности, простирающейся между долинами рек Ока и Клязьма в их среднем и нижнем течении. Климат местности континентальный с холодной зимой и умеренно теплым летом. Энергоблок ПГУ-400 с северной стороны граничит с озером Чёрное, что обуславливает повышенную влажность воздуха.

Как видно из представленной информации, обе ГРЭС находятся в различных климатических условиях. Общим для них является расположение на берегу рек и водоемов, что является источником повышенной влажности атмосферного воздуха.

На Сургутской ГРЭС-2 преобладающим является западное и юго-западное направления ветра, которые дуют со стороны водохранилища, принося с собой капельную влагу. В процессе эксплуатации двух энергоблоков ПГУ отмечалось попадание атмосферной влаги на импульсные фильтры КВОУ [6]. На Рисунке 3.8а отчетливо видны следы подтеков воды по фронтальной поверхности фильтров (указано красной стрелкой).

Следует отметить, что на каждом фильтре GE написано предупреждение: “DO NOT WASH”- «НЕ МЫТЬ», поскольку их фильтровальный материал представляет собой целлюлозно-синтетическую смесь, которой влага противопоказана (Рис.3.8б).

Факт попадания атмосферной влаги на импульсные фильтры говорит о следующем:

- Погодные козырьки и влагоотделитель (коагулятор) КВОУ не предотвращают попадание влаги из атмосферного воздуха.

- Применение импульсных фильтров, которым противопоказана любая влага, для КВОУ ГРЭС, работающей на берегу водохранилища, является неоправданным.

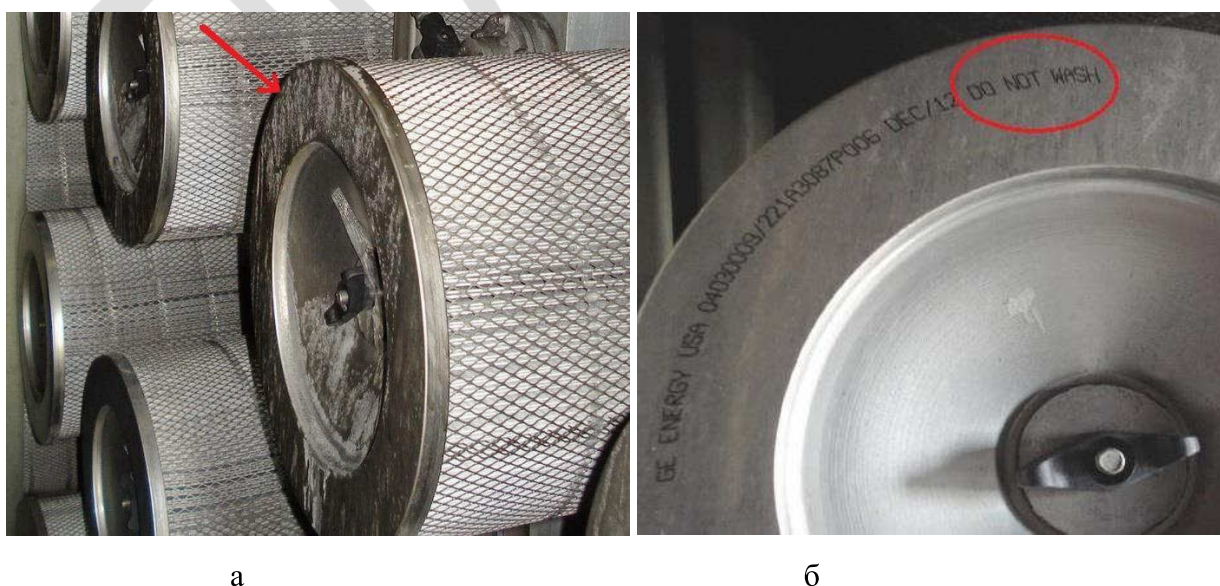


Рис. 3.8. Сургутской ГРЭС-2: а- подтеки влаги; б- предупреждение «НЕ МЫТЬ» [6]

Другой проблемой для импульсных фильтров стал тополиный пух, который полностью блокировал фильтровальный материал и очистить его воздушным импульсом невозможно (Рис.3.9). Очистка фильтров осуществлялась сжатым воздухом после их снятия. Однако, через три месяца (с конца июля до конца октября) перепад давления превысил максимальную величину (Табл.3.3), после которой требуется замена фильтров (1031 Па).



Рис. 3.9. Блокировка импульсных фильтров тополиным пухом: а- в Сургуте; б- в Шатуре.

Табл. 3.3. Данные о перепадах давления фильтров и допустимые размеры частиц

Наименование параметра Parameter Description		Величина параметра Parameter Value
Система впуска воздуха Air inlet system		
Номинальная потеря давления на новом воздушном фильтре, кПа Rated Pressure Drop on New Air Filter, kPa		0,495
Максимальная потеря давления на фильтре, требующем замены, кПа Maximum Pressure Drop on Air Filter to be Replaced, kPa		0,996
Максимальные допустимые размеры частиц при обеспечении качества подаваемого воздуха, мкм Maximum Allowable Particle Sizes to Maintain Inlet Air Quality, micron	Наиболее крупные Supercoarse	> 10
	Крупные Coarse	От 2,5 до 5 From 2.5 to 5
	Мелкие Fine	От 0,1 до 2,5 From 0,1 to 2,5
	Очень мелкие Ultrafine	< 0,1

В процессе мониторинга окружающей среды Сургутской ГРЭС-2 и Шатурской ГРЭС нами было установлено, что количество мелкодисперсных частиц размером 0,3-1 мкм в атмосферном воздухе этих электростанций более 99%. В тоже время, согласно паспортным данным компании GE эффективность новых импульсных фильтров составляет 94,1 % для частиц размером 8.37 мкм, согласно ASHRAE 52.2 (американское общество по отоплению, холодильной технике и кондиционированию воздуха). В этом случае, можно констатировать, что импульсные фильтры GE могут удалять менее 1% всех частиц, поступающих в ГТУ, что безусловно скажется на состоянии лопаток и проточной части турбомашин (Рис.3.10).



Рис. 3.10. Лопатки ВНА компрессора GE PG935FA Шатурской ГРЭС [6]

По просьбе руководства генерирующей компании был выполнен сравнительный анализ импульсных фильтров компании GE ENERGY USA с импульсными фильтрами другого производителя. В качестве аналога была выбрана компания Mikropor (Турция), которая изготавливает аналогичные импульсные фильтры для компании GE ENERGY с логотипом ТКУ (Турция) - GE ENERGY ТКУ.

Целью данного исследования являлся поиск альтернативы импульсным фильтрам компании GE ENERGY USA в виду неудовлетворительной работы системы фильтрации ГТУ GE PG935FA. Исследованию были подвержены новый импульсный фильтр GE ENERGY USA, взятый с Шатурской ГРЭС и аналогичный фильтр GE ENERGY ТКУ, производства компании Микропор, Турция.

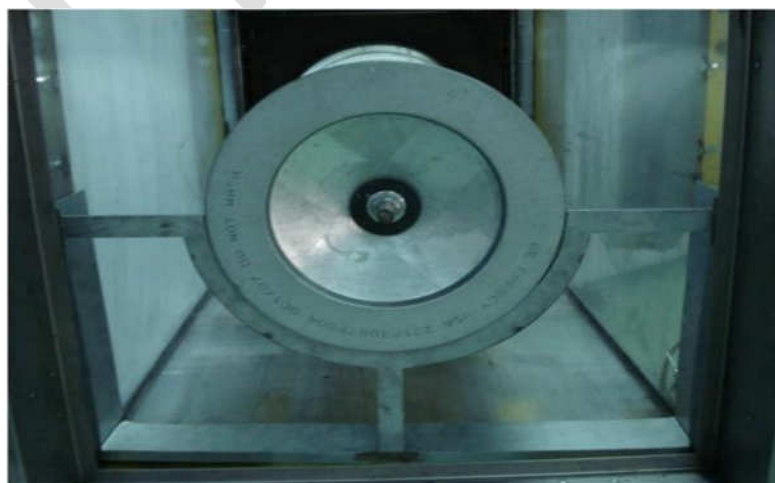
В план работ входило определение и сравнение массо - габаритных показателей обоих типов фильтров, выявление их конструктивных особенностей, оценка начальной эффективности очистки и энергоэффективности новых фильтров.

В табл.3.4. представлены технические параметры импульсных фильтров GE (USA) и GE (TKY).

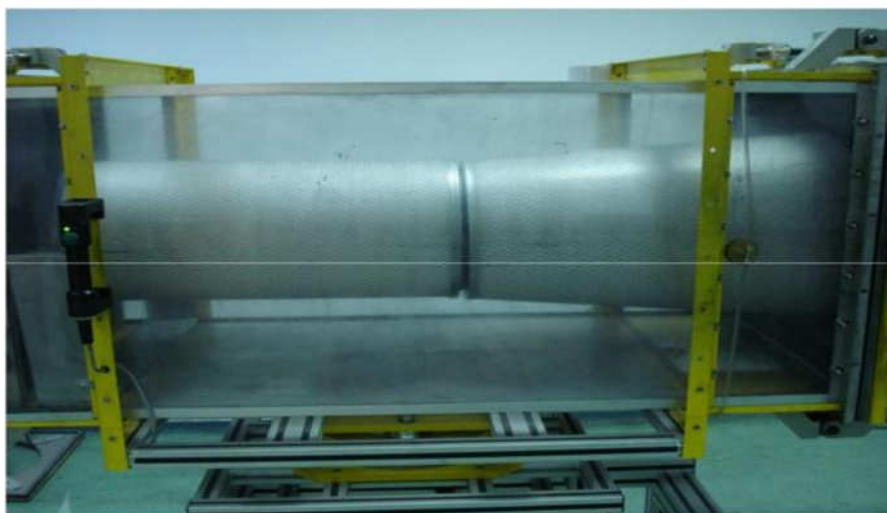
Табл.3.4. Технические характеристики импульсных фильтров GE (USA) и GE (TKY)

№	Технический параметр	GE ENERGY TKY 221A3087P063 (Mikropor)		GE ENERGY USA 221A3087P004
		Паспорт	Замер*	
1	Наружный диаметр цилиндрического фильтра	324 мм	324 мм	324 мм
2	Внутренний диаметр цилиндрического фильтра	216 мм	214 мм	212 мм
3	Наружный диаметр конического фильтра	445 мм	444 мм	444 мм
4	Внутренний диаметр конического фильтра	330 мм	331 мм	327 мм
5	Высота обоих фильтров	660 мм	661 мм	661 мм
6	Металлические части фильтра	Оцинкованная сталь		Оцинкованная сталь
7	Фильтровальный материал фильтра	Синтетическое волокно с добавлением микро-стекловолокном		Нет информации
8	Наружный диаметр прокладки	285 мм		281 мм
9	Высота прокладки	12 мм		11,3 мм
10	Глубина плиссировки фильтровального материала	46,5 мм		48 мм
11	Вес фильтра цилиндрического/конического	12 803 грамм 5971/6832 грамм		13 636 грамм 6348 /7288 грамм
12	Начальный перепад давления	145 Па	150 Па	183 Па
13	Номинальный расход воздуха	2600 м ³ /ч		2600 м ³ /ч
14	Эффективность очистки фильтра	77,1 %		38,5 %
15	Энергоэффективность фильтра	1301 кВт*ч		1583 кВт*ч

Тестирование фильтров GE ENERGY USA и GE ENERGY TKY производилось на испытательном стенде компании Микропор в городе Анкара (Турция). На рис.3.11 представлены фото испытанных фильтров.



а



б

Рис.3.11. Импульсные фильтры на испытательном стенде компании Микропор:
а - GE ENERGY USA; б- GE ENERGY ТКУ

По результатам выполненного сравнительного анализа импульсных фильтров двух производителей можно сделать следующие выводы:

1. Импульсные фильтры компании Микропор и GE USA имеют идентичные габаритные размеры.
2. Разница в весе фильтров (833 грамма) обусловлена более тяжелой внутренней и внешней решеткой, обрамляющей фильтр GE USA (просечно - вытяжная оцинкованная сталь).
3. Фильтр Микропор имеет лучшую фиксацию внутренней и внешней решетки (металлическая пластина с точечной сваркой), чем у фильтра GE USA (скрутка сетки в узел).
4. Прокладка фильтра Микропор (пена вместо полиуретана) припаяна к корпусу фильтра, а у фильтра GE USA она приклеена.
5. Фильтр производства Микропор, в отличие от фильтра GE USA, имеет более равномерную укладку фильтровального материала.
6. Начальный перепад давления на фильтре GE USA на 33 Па выше, чем у фильтра компании Микропор. В случае использования фильтров Микропор на Шатурской ГРЭС и Сургутской ГРЭС недопроизводство электроэнергии ГТУ GE PG 9351FA, обусловленная снижением начального перепада давления на фильтрах, уменьшится на 1,69 МВт.

7. Начальная эффективность фильтра Микропор для частиц размера 0,4 мкм в 2 раза выше эффективности фильтра GE ENERGY USA
8. Энергоэффективность Микропор фильтра выше, чем у фильтра GE USA на 282 кВт*часа. В случае применения фильтров компании Микропор на Шатурской ГРЭС (756 фильтров в одном КБОУ) ежегодная выработка электроэнергии ГТУ GE PG 9351FA повысится на 213,2 МВт* час. Для Сургутской ГРЭС (1512 фильтров в двух КБОУ) эта величина составит 426,4 МВт* час.

Чтобы избежать сильного загрязнения и эрозийного износа компрессорных лопаток, как было зафиксировано на осевом компрессоре GE PG935FA (см. рис.3.10), строго рекомендуется поместить за фильтрами импульсной очистки конечную ступень статистических фильтров группы EPA класса E10 для обеспечения необходимой защиты компрессора ГТУ (Рис. 3.12).

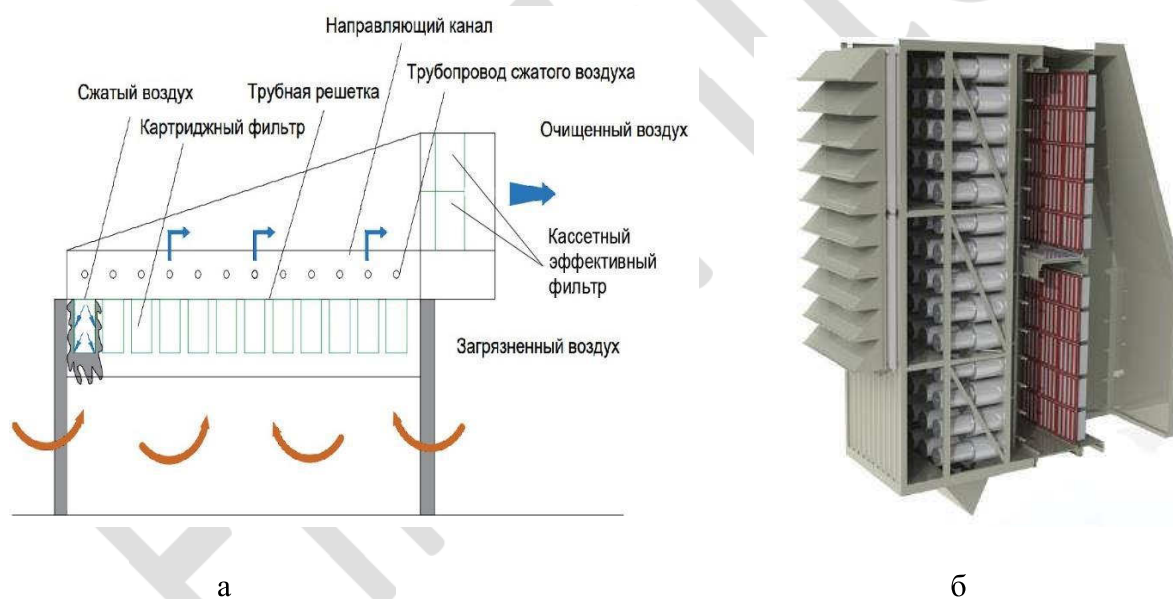


Рис. 3.12. КБОУ с импульсными и статическим фильтрами, всас: а - снизу; б – осевой (рисунок «б» из буклета компании Camfil Svenska)

Суммируя всё вышесказанное по КБОУ с фильтрами импульсного типа, необходимо отметить следующее:

1. В экстремальных условиях пыльных бурь импульсные фильтры работают эффективно, в обычных климатических условиях их эффективность мала.
2. Эффективность импульсных фильтров быстро снижается при наличии в атмосфере несгоревших углеводородов и влаги. Содержание воды в атмосферном воздухе

приводит к расширению волокон целлюлозы и, как следствие, к значительному повышению перепада давления на фильтре.

3. Фильтрующий материал из стекловолокна в импульсных фильтрах применяется редко, ввиду его возможного разрушения при воздушных импульсах.

4. Рекомендуется использовать фильтры импульсной очистки вместе со статическими фильтрами конечной (финишной) очистки высокой эффективности для обеспечения защиты лопаток компрессоров ГТУ от загрязнения и эрозионного износа

Евва Filter

3.2. Статические системы очистки воздуха энергетических ГТУ

Оснащение КВОУ определенной системой фильтрации и количеством ступеней очистки циклового воздуха ГТУ зависит от региона расположения электростанции. На Рис. 3.13 представлена система фильтрации КВОУ, состоящая из жалюзийного каплеуловителя, карманного ФГО/ФСО и кассетного ФТО.

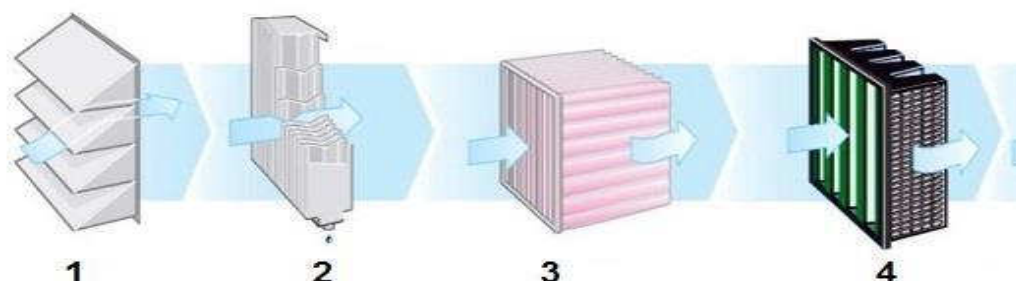


Рис. 3.13. Система фильтрации циклового воздуха ГТУ: 1 - погодные козырьки, 2 - жалюзийный каплеуловитель, 3 - карманный ФГО/ФСО, 4 - кассетный ФТО.
(рисунок из буклета компании Camfil Svenska)

Погодные козырьки КВОУ предназначены для предотвращения попадания атмосферных осадков в виде мокрого снега и дождя на воздушные фильтры системы фильтрации циклового воздуха ГТУ. Капельная влага удаляется в стационарном каплеуловителе КВОУ. Каплеуловитель отклоняет насыщенный каплями поток воздуха, в результате чего капли по инерции сталкиваются с поверхностью профильных пластин. Капли сливаются вместе и образуют жидкую пленку, которая под действием силы гравитации стекает вниз по пластинам. Специальная конструкция профилей каплеуловителей повышает эффективность отделения более мелких капель и обеспечивает свободное стекание жидкости (Рис.3.14).

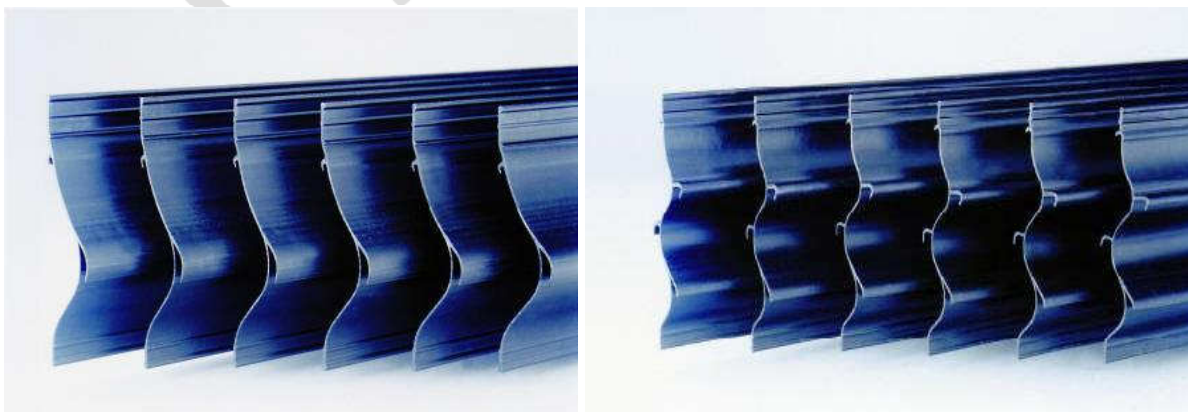


Рис. 3.14. Каплеуловители влаги разного профиля: а- один изгиб; б- два изгиба
(<https://www.munters.com>)

Очищенный от капельной влаги атмосферный воздух поступает в фильтры грубой очистки класса G2-G4 (ISO T2-T4) или средней очистки класса M5-M6 (ISO T5-T6) согласно ГОСТ Р EN 779-2014 (ISO 29461-1), где крупно и средне дисперсных частиц задерживаются. Дальнейшая очистка циклового воздуха ГТУ осуществляется в фильтрах тонкой очистки. Класс очистки конечных (финишных) фильтров, в зависимости от концентрации и дисперсности частиц в воздухе после фильтров предварительной очистки, может варьироваться от класса F(T7-T9) до класса E (T10-T12).

Такие системы очистки воздуха, по количеству ступеней воздушных фильтров, называются двухступенчатыми. Они обычно применяются для ГТУ, работающих в условиях умеренной влажности и запыленности воздуха (Рис.3.15).



Рис.3.15. КВОУ с двумя ступенями очистки воздуха [7].

Для более сложных, с климатической точки зрения условий, применяются трехступенчатые системы фильтрации воздуха (Рис.3.16).

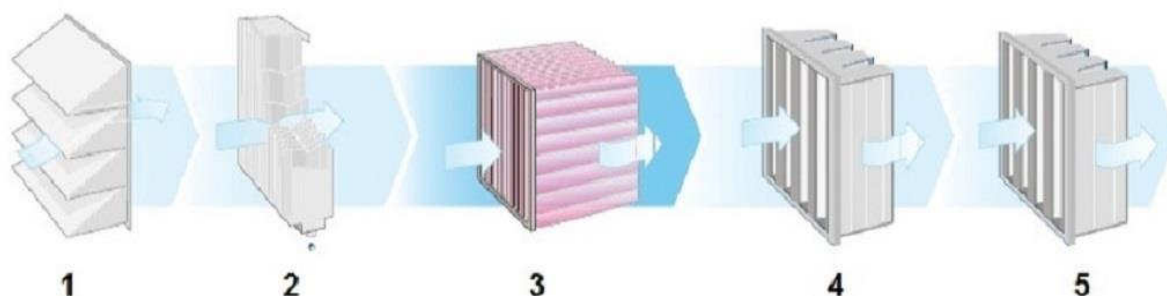


Рис. 3.16. Трехступенчатая система фильтрации циклового воздуха ГТУ:

1 - погодные козырьки, 2 - жалюзийный каплеуловитель, 3 - карманный ФГО/ФСО, 4 и 5- кассетный ФТО [7].

Второй и третьей ступенью очистки циклового воздуха ГТУ в этой системе служат ФТО различной эффективности. Например, ФТО второй ступени являются фильтр-элементы класса F7-F9 (Т7-Т9), а третью ступень представляют фильтры класса E10- E12 (Т10-Т12) согласно ГОСТ Р ИС 1822-1-2010 (ISO 29461-1).

Такая же система фильтрации циклового воздуха ГТУ применяется и при отсутствии в КВОУ штатных каплеуловителей (Рис.3.17). В этом случае в качестве фильтров первой ступени используются фильтры, обладающие качествами фильтра коагулятора, удаляющего капельную влагу и туман, а также фильтра грубой/средней очистки.



Рис.3.17. КВОУ с трехступенчатой системой фильтрации (рисунок из буклета компании Freudenberg Filtration Technologies)

С ростом количества ступеней фильтрации осевые размеры КВОУ увеличиваются, растут массогабаритные показатели и стоимость этого оборудования. Одна из существенных статей расхода при изготовлении КВОУ являются металлоконструкции из нержавеющей, оцинкованной и низкоуглеродистой стали. Для снижения веса, а также стоимости КВОУ для ГТУ, используются различные конструктивные решения. Одним из них является размещение нескольких ступеней фильтрации на одной стене КВОУ, что позволяет сократить осевые размеры устройства, а также его вес и стоимость металлоконструкций. Совмещение нескольких ступеней фильтрации в одну конструкцию получило название комбинированная система фильтрации (КСФ). Рассмотрим наиболее часто применяемые из них, оценим их достоинства и недостатки.

3.2.1 Комбинированные системы фильтрации

20.01.2009 году был получен патент на полезную модель «Комбинированная система фильтрации» [8]. КСФ предусматривает размещение трех ступеней фильтрации в одном пластмассовом корпусе и предназначена для подготовки циклового воздуха газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Первая ступень очистки предназначена для улавливания и отвода капельной влаги, очистки атмосферного воздуха от крупных включений. Фильтр-коагулятор изготовлен из стекловолоконного материала толщиной 50 мм, соответствующий классу очистки G2, согласно ГОСТ Р ЕН 779-2014. Фильтр второй ступени – карманный (длина карманов 200 мм) изготовлен из синтетического материала класса G4, крепится в пластмассовой раме. Фиксация фильтров первой и второй ступени в корпусе КСФ осуществляется стержнями, размещенными по диагонали со стороны входа воздуха. Третья ступень очистки воздуха класса F8-F9 устанавливается в несущие рамки корпуса. На рис.3.18 представлено размещение и крепление КСФ в воздухоочистительном устройстве (ВОУ) ГТУ одной из компрессорных станций (КС) [9].



а

б

Рис.3.18. КСФ в ВОУ ГТУ на ГПА: а- в сборе; б- крепление ступеней

В статье [10], отмечается, что КСФ нашла широкое применение на КС, что позволило существенно сократить массу и стоимость ВОУ ГПА. В этой работе утверждается, что КСФ может использоваться на всей территории России за исключением районов со среднегодовой концентрацией твердых примесей в атмосферном воздухе не более $0,15 \text{ мг/м}^3$. Эти районы расположены южнее линии Белгород- Воронеж – Волгоград – Саратов, площадь которых не превышает 15% нашей страны.

Однако, как показал опыт эксплуатации ГПА выше линии, обозначенной авторами, при температуре атмосферного воздуха ниже -30°C и влажности более 80% на ряде ВОУ,

работающих в условиях севера отмечалось обмерзание фильтров коагуляторов первой ступени КСФ, приводящее к полной блокировке всех трех ступеней очистки воздуха [11].

В 2008 году была предпринята попытка использования КСФ в электроэнергетике на двух КВОУ для нововведенных в эксплуатацию ГТЭ-110. Несмотря на не экстремальные климатические условия в этом регионе нашей страны, в процессе эксплуатации отмечалось обмерзание и занос снегом не только фильтров-коагуляторов первой ступени Poret, но и карманных фильтров второй ступени КСФ (Рис.3.19) [9].



а

б

Рис.3.19. КСФ в КВОУ ГТЭ-110: а- обмерзание; б- занос снегом второй ступени

Проблемы, выявленные в процессе эксплуатации КСФ, обусловлены как дизайном самой трехступенчатой системой фильтрации, размещенной в одном корпусе, так и конструктивными ошибками антиайсинговой системой (АОС) ВОУ и КВОУ, приводящими к ее неэффективной работе. Фильтр коагулятор класса G2 толщиной всего 50 мм не может эффективно очищать воздух от атмосферных осадков в виде дождя и снега. Согласно ранее выполненным исследованиям, для предотвращения попадания атмосферной влаги, проникшей через фильтр первой ступени на последующие фильтр-элементы, расстояние от фильтра коагулятора до фильтра второй ступени КВОУ должно составлять порядка 800 - 1000 мм. Именно по этой причине, в последующем, на двух других КВОУ для ГТЭ-110, было принято решение отказаться от применения трехступенчатых КСФ и первую ступень фильтрации (коагулятор) установить отдельно от двух других. При этом толщина фильтра коагулятора Poret была увеличена до 100 мм в рамке. Однако, и при отдельной установке фильтра коагулятора и уже двухступенчатой КСФ, качественной очистки воздуха от атмосферных осадков не происходило. На Рис.3.20, сделанном в КВОУ энергетической ГТУ, видно, что все ФТО в КСФ мокрые.



Рис.3.20. Раздельная установка фильтра коагулятора и КСФ

На рис.3.21 изнутри короба зафиксировано состояние фильтров грубой класса G4 и тонкой очистки класса F9 (ГОСТ Р Н 779-2014) в двухступенчатой КСФ того же производителя.



а

б

Рис.3.21. Двухступенчатая КСФ: а- состояние ФГО и короба; б- состояние ФТО

Как видно на рис.3.26а в коробе скапливается большое количество влажных отложений крупных частиц, не очищенных ФГО, которые попадают в ФТО (Рис.2.35б). Очевидно, ФГО класса G4 не обеспечивает заданный уровень очистки воздуха перед ФТО класса F9. В результате чего на ФТО поступает большое количество крупнодисперсных частиц, что приводит к более интенсивному росту перепада давления и снижению срока жизненного цикла конечного фильтра.

Исходя из требований ГОСТ Р Н 779-2014 по устойчивости материалов фильтров к воздействию коррозии, рамки воздушных фильтров обычно изготавливаются из различных видов пластмасс, которые должны быть устойчивы к возможным

механическим воздействиям во время обычной эксплуатации.

В паспорте фильтр - бокса производителя КСФ написано: «Корпус пластиковый. Компоненты корпуса включают в себя следующие вещества: полистирол, синтетическое волокно, полиуретан, стеклопластик, эфир уксусной кислоты». И что из этого следует? Практически ничего: ни марки пластмассы, ни ее технических характеристик, ни соотношения химических компонентов, ни веса фильтр - бокса, ни гидравлических потерь, вызванных установкой этого устройства в КВОУ ГТУ.

Такое же положение дел обстоит и с корпусами отдельно стоящих влагоуловителей Poret. В их паспортах также указана уже известная фраза – «пластиковая рамка».

На рис.3.22 представлена полученная нами зависимость перепада давления от расхода воздуха в процессе тестирования этого фильтр - бокса на аэродинамическом стенде [12]. Вес этого фильтр – бокса с размерами 595x595x421 мм в комплекте с двумя фиксирующими стержнями составил 2,4 кг. Полученные нами величины должны были бы указаны в паспорте этого устройства.

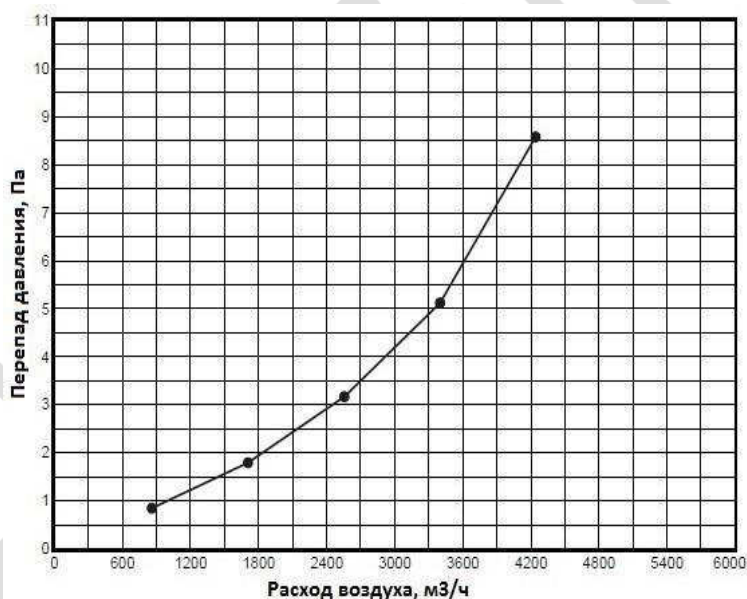


Рис.3.22. Перепад давления на боксе КСФ

В паспорте КСФ в разделе гарантии указано, что гарантийный срок составляет 12 месяцев с момента поставки и 18 месяцев с момента производства. Однако, как показал опыт эксплуатации КСФ на энергетических объектах нашей страны, требования ГОСТ Р Н 779-2014 по устойчивости к возможным механическим воздействиям во время обычной эксплуатации не всегда выполнялись.

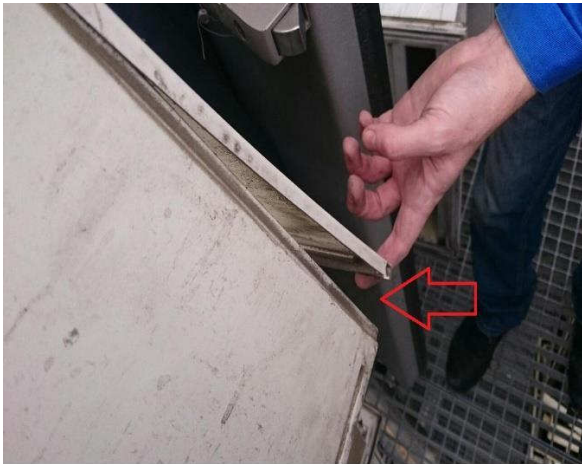
На рис.3.23 приведены типичные неисправности фильтр – боксов КСФ, зафиксированные в процессе эксплуатации КВОУ энергетических ГТУ [12].



а



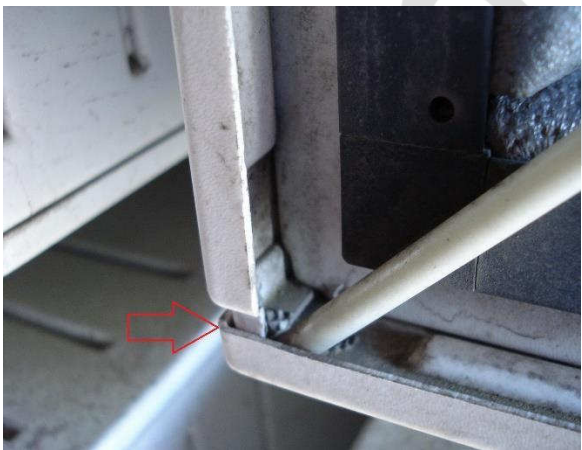
б



в



г



д



ж

Рис. 3.23. Типичные повреждения фильтр-блока КСФ: а – разрушение конструкции; б – трещина пластмассы и зазоры в конструкции; в – нарушение целостности конструкции; г – поломка пластмассы и разрушение целостности конструкции; д – разрушение сварки составных частей корпуса; е – трещина корпуса.

Как видно из представленных фотографий основными недостатками конструкции этих фильтр – боксов являются неоптимальная толщина листовой пластмассы и, как следствие,

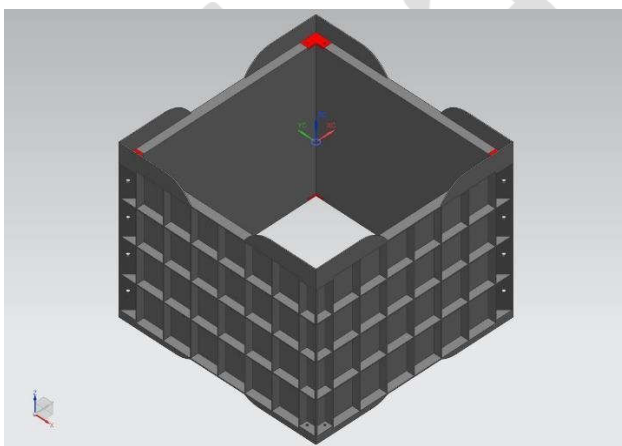
ее ломкость, некачественная приварка составных частей конструкции, ее не герметичность, неустойчивость к механическим воздействиям во время обычной эксплуатации.

На рис.3.24 представлены поврежденные пластмассовые рамки фильтров коагуляторов из пористого полиуретана. Причины их массовых поломок аналогичны повреждениям фильтр – боксов.



Рис.3.24. Поврежденные рамки фильтров коагуляторов Poret

Для обеспечения необходимой прочности конструкции фильтр – боксов другие производители этой продукции применяют монолитную конструкцию с ребрами жесткости (Рис.3.25а) и оптимальной толщиной материала (Рис.3.25б).



а



б

Рис.3.25. Фильтр-боек компании Микропор: а-3D макет; б- в КВОУ энергетической ГТУ

В качестве материала этого фильтр – бокса используется АБС – пластик [13]. Срок службы этих изделий не исчерпывается одним годом, как у ранее рассмотренных фильтр – боксов. Фильтр - боксы, изображенные на рис.3.25, проработали в КВОУ ГТУ ТЭЦ более 7 лет и продолжают эксплуатироваться без каких-либо повреждений.

АБС (акрилонитрилбутадиеновый) пластик - это термопластичный аморфный тройной сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола, название которого образовано из начальных букв наименований мономеров. Пропорции химических компонентов могут варьироваться в пределах: 15—35 % акрилонитрила, 5—30 % бутадиена и 40—60 % стирола. Химическая формула этого вещества выглядит следующим образом - $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$. Продукт привитой сополимеризации стирола с акрилонитрилом и бутадиеновым каучуком, получаемый эмульсионной сополимеризацией стирола с акрилонитрилом в присутствии латекса каучука. Сочетание акрилонитрильных и бутадиеновых звеньев с фрагментами стирола обеспечивает АБС-пластику эластичность и необходимую ударопрочность, что делает его одним из самых востребованных пластиков для производства сложных формованных изделий с высокой степенью вытяжки. АБС-пластик выпускается стабилизированным в виде белых гранул или порошка.

АБС-пластик - ударопрочный материал, относящийся к инженерным пластикам. Обладает более высокой стойкостью к ударным нагрузкам по сравнению с полистиролом общего назначения, ударопрочным полистиролом и другими сополимерами стирола. Превосходит их по механической прочности и жесткости. Износостоек. Выдерживает кратковременный нагрев до 90-100° С. Максимальная температура длительной эксплуатации: 75-80° С. АБС-пластик пригоден для нанесения гальванического покрытия, для вакуумной металлизации, а также для пайки контактов. Хорошо сваривается. Рекомендуются для точного литья. Имеет высокую размерную стабильность. Дает блестящую поверхность. Стоек к щелочам, смазочным маслам, растворам неорганических солей и кислот, углеводородам, жирам, бензину. Растворяется в ацетоне, эфире, бензоле, этилхлориде, этиленхлориде, анилине, анизоле.

К его недостаткам можно отнести то, что он не стоек к ультрафиолетовому излучению, характеризуется пониженными электроизоляционными свойствами по сравнению с полистиролом общего назначения и ударопрочным полистиролом. Некоторые виды АБС могут разрушаться под воздействием солнечного света [14]. Это, в свое время, стало причиной одного из самых больших и дорогостоящих отзывов автомобилей в истории США.

Аналогичные данные с техническими характеристиками должны предоставляться в паспортах изделий из пластика, применяемых для систем фильтрации циклового воздуха ГТУ. Кроме того, вместе с паспортом изделия, должны предоставляться результаты тестов низкотемпературных испытаний этих устройств в климатических камерах при температурах, соответствующих конкретному региону эксплуатации КВОУ ГТУ согласно

ГОСТ 15150-69 [15].

Помимо этих документов, подтверждающих выполнение требований, действующих ГОСТ к данной продукции и соответствие ее технических параметров ТУ, персонал электроэнергетических компаний во время входного контроля сам может проверить отдельные технические характеристики пластмассовых изделий и сравнить их с ТУ с помощью не сложных мерительных инструментов.

В соответствии с ГОСТ 24622-91 (ИСО 2019/2-97) и ГОСТ 24621-91 (ИСО 868-85) определение твердости пластмасс может осуществляться по Роквеллу и Шору [16,17]. Эти методы являются эмпирическими испытаниями, предназначенными, прежде всего, для контроля данного показателя. Принцип методов заключается в измерении глубины вдавливания в материал определенного индентора под действием силы в заданных условиях. Твердость при вдавливании обратно пропорциональна глубине вдавливания и зависит от модуля упругости и вязкоэластичных свойств материала.

На рис.3.26 изображен момент определения твердости пластмассового корпуса воздушного фильтра тонкой очистки с помощью твердомера (дюрометра) по Шору тип D. Дюрометр типа А применяется для определения твердости мягких пластмасс и резиновых изделий (например, прокладок фильтров).



Рис.3.26. Определение твердости пластмассы дюрометром по Шору тип D

25.04.2014 года была получена заявка, а затем и выдан патент на полезную модель «Устройство очистки воздуха (варианты)» отечественной компании Ф [18]. Как отмечено в этом документе наиболее близким аналогом патентуемого решения является первого патента [8], недостатком которого, по мнению заявителя, является небольшая площадь

фильтровального материала фильтра грубой очистки второй ступени фильтрации. Отличие предложенных вариантов размещения фильтров заключается в реверсной установке кассетного фильтра грубой очистки (ФГО) с повышенной площадью фильтрации к фильтру тонкой очистки (ФТО) и отказе от дополнительного корпуса для размещения фильтров. Вместо панельного материала (мата) влагоотделителя в первом патенте, предложен чехол, одеваемый на ФГО, как это показано на Рис.3.27.

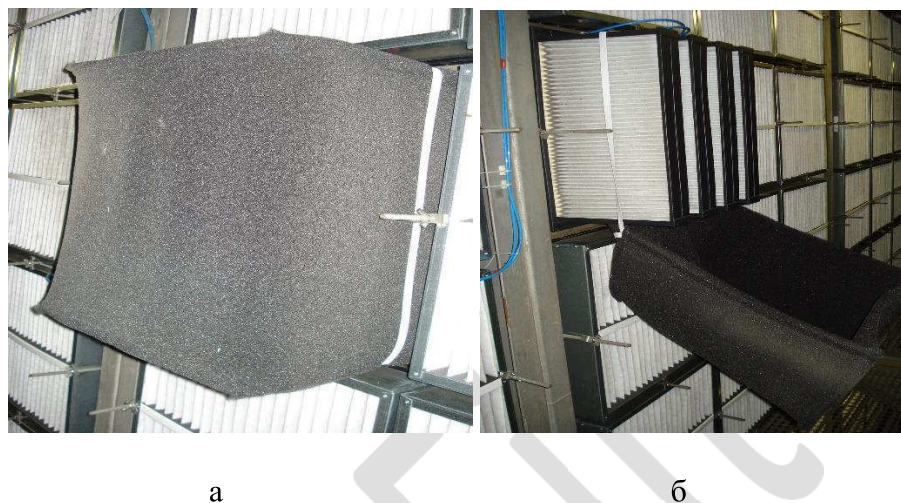


Рис.3.27. Устройство очистки воздуха по патенту № RU 145900 U1 в КВОУ: а - внешний вид; б – реверсное крепление ФГО и ФТО при снятом чехле.

В отличие от аналога, в данном техническом решении, целесообразно отметить отказ от единого корпуса размещения воздушных фильтров. Опыт эксплуатации пластмассовых корпусов для систем фильтрации воздуха показал их хрупкость и не долговечность, ввиду непрочного крепления элементов и недостаточной толщины пластмассы. Кроме того, пластмассовые корпуса имеют определенный перепад давления, который не указывается в паспортах изделия. Так перепад давления на пластмассовом корпусе КСФ при расходе воздуха 3400 м³/ч равен 5 Па, а при 4250 м³/ч - 8,5 Па (см. рис.3.27).

Следует отметить, что предложенное во втором патенте [18] техническое решение имеет те же недостатки, что и его аналог [8]. В первую очередь это близкое размещение чехла, выступающего в роли коагулятора, для улавливания атмосферных осадков в виде дождя, к фильтру предварительной очистки. В синтетическом чехле нет водоотводящих (дренажных) канавок или других подобных технических решений. В процессе установки одного такого устройства на КВОУ ГТУ (см. рис.3.32) было зафиксировано, что толщина чехла не позволяет полностью предотвратить проникновение атмосферной влаги на ФГО. Лента, крепящая чехол к кассетному фильтру второй ступени, не обеспечивает плотного прилегания, а, следовательно, и полной герметизации. Влага, поступающая вместе с

потоком воздуха и стекающая вниз под действием силы гравитации с верхних ярусов КВОУ, приводит к намоканию кассетного фильтра.

В весенне-летний период времени двукрылые насекомые и плоды цветения растений в считанные дни и даже часы могут блокировать фильтры первой ступени КВОУ ГТУ. Очистка чехла во втором патенте от осевших на него насекомых, тополиного пуха, одуванчиков займет значительно больше времени, чем с типового плоского мата фильтра коагулятора, ввиду его увеличенной площади. В случае сильного загрязнения чехла несгоревшими углеводородами потребуется его регенерация (стирка), которая может привести к деформации или повреждению формы.

Главным недостатком технических решений обоих патентов является полная блокировка всех трех ступеней фильтрации в случае обледенения первой ступени очистки при низких температурах и высокой влажности атмосферного воздуха, а также при сильном загрязнении окружающей среды во время лесных пожаров. Кроме того, следует отметить недостаточно высокий класс очистки фильтров коагуляторов и ФТО в этих технических решениях.

Очевидно, что предлагаемые в этих патентах технические решения не могут быть в полной мере использованы в электроэнергетике в виду отмеченных недостатков, а также последствий, к которым они могут привести при бесперебойном обеспечении энергетической безопасности нашей страны.

В заключение следует отметить, что Решением Федеральной службы по интеллектуальной собственности в 2022 году патент на полезную модель №145900 U1 был признан недействительным частично и автору был выдан новый патент с уточненной формулой полезной модели.

Современные КВОУ для энергетических ГТУ оснащены многоступенчатыми системами фильтрации атмосферного воздуха, состоящими из погодных козырьков, защиты от птиц и мусора, сезонной защиты (сеток) от двукрылых насекомых и плодов цветения растений, отдельно стоящей степени очистки воздуха от атмосферной влаги (влагоотделители или коагуляторы) и комбисистемы, включающей ФГО и ФТО. Как показал опыт эксплуатации комбинированных систем фильтрации разных производителей для КВОУ ГТУ, существенной значение на их эффективность и срок службы оказывает способ их крепления друг к другу.

В 2013 году на нововведенную ТЭС, расположенную на берегу Черного моря, были поставлены двухступенчатые КСФ иностранной компании VA, рекламирующие, разработанное ими крепление ФГО к ФТО, позволяющее быстро осуществлять установку и снятие панельных фильтров грубой очистки (Рис.3.28а). На деле это крепление представляло из себя обыкновенные «липучки», прикрепленные взаимнообразно по краям ФГО и ФТО на двусторонний скотч. Действительно, снятие и установка ФГО первоначально осуществлялась быстро. Однако, надежность и долговечность такого незамысловатого крепления фильтров оказались минимальными.

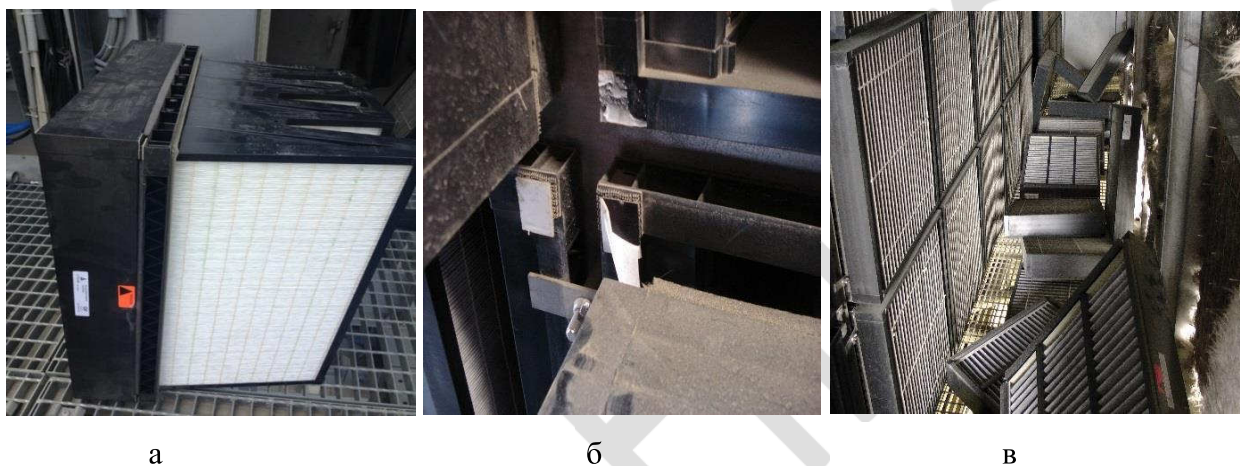


Рис.3.28. Комбинированная система иностранной компании VA: а – внешний вид; б – отрыв «липучек» фильтров в КВОУ; в - массовое выпадение ФГО в КВОУ ГТУ ТЭС.

Во время возведения олимпийских объектов в этом месте загрязненность воздуха была достаточно высокой, ввиду близкого расположения к ТЭС нескольких цементно-раздаточных узлов, интенсивного движения грузового автотранспорта и поднимаемой им в воздух пыли. В результате чего ФГО быстро заполнялись пылью, «липучки», крепящие их к ФТО, не выдерживали веса загрязненного фильтра и отрывались (Рис 3.28б). Персонал ТЭС был вынужден проводить многие часы за ремонтом этого ненадежного крепления, путем приклеивания «липучек» к корпусам ФГО и ФТО. Однако, несмотря на огромные затраты человеко- часов персоналом ТЭС на незапланированные ремонтные работы, было зафиксировано массовое выпадение ФГО (Рис.3.28в), в результате чего ФТО остались без защиты и в них поступало большое количество пыли, приводящее к росту перепада давления и снижению срока жизненного цикла. В последующем комбисистемы компании VA на ТЭС были заменены на систему фильтрации шведского производителя компании С (рис.3.29). Как показал опыт эксплуатации КСФ этого производителя, их слабым местом также оказалось крепление ФГО к ФТО.

Если в регионе Черного моря на ТЭС с теплым климатом было зафиксировано всего несколько (6-8) поломок платмассового крепления (защелок), то на ТЭЦ в Московской области в течение зимнего периода эксплуатации вышло из строя порядка 60% (Рис.3.29а). Для исправления сложившейся ситуации производитель фильтров предложил другой вариант крепления ФГО к ФТО с помощью устройства Snap-on (Рис.3.29б).

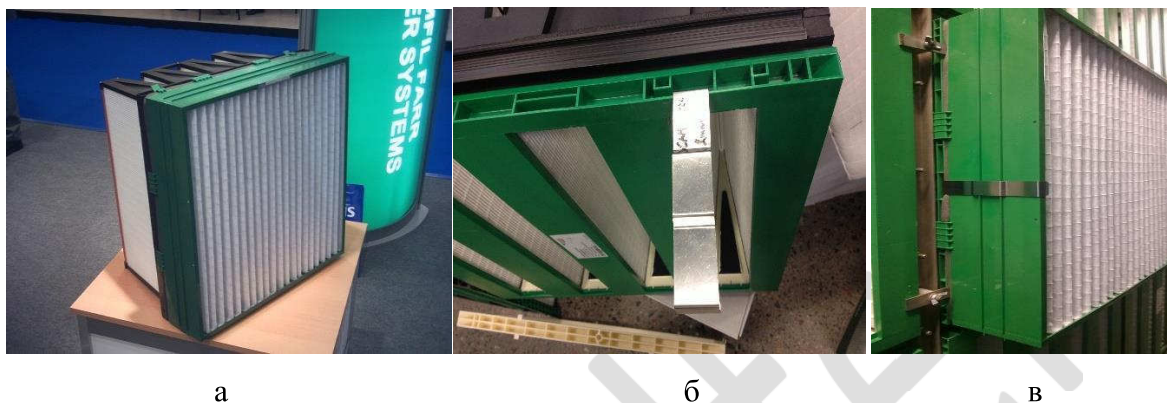


Рис.3.29. Комбинированная система шведской компании С: а- внешний вид; б, в- механизмы Snap-on крепления ФГО и ФТО.

Американская компания ААФ предлагает механизм Easy Fit присоединения предфильтра М80 к ФТО в новой системе фильтрации Easy Care (Рис.3.30).

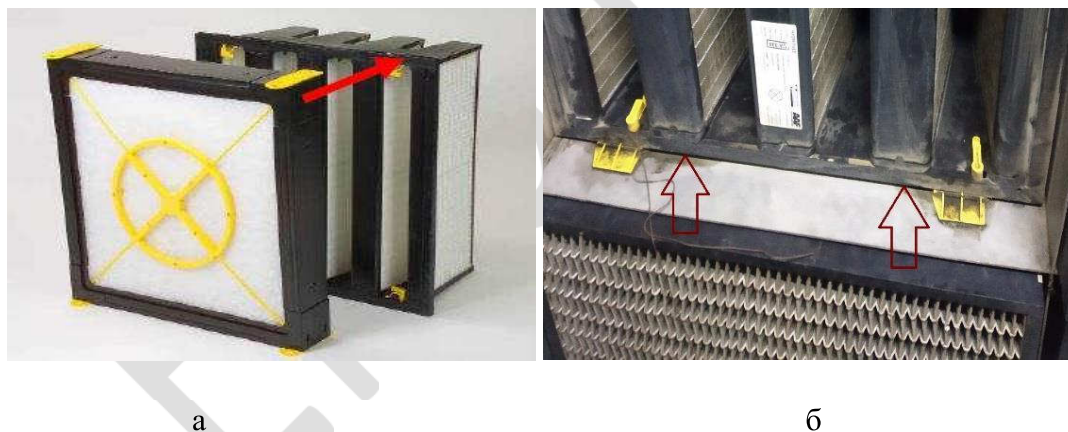


Рис.3.30. Крепление ФТО в комбинированной системе Easy Care американской компании ААФ: а- внешний вид; б- крепление фильтров механизмом Easy Fit.

Матрицы (желтого цвета) устанавливаются в металлическом боксе КВОУ, как показано на рис. 3.30а, после чего штыри (тоже желтого цвета) вставляются в отверстия матрицы и фиксируют ФТО путем поворота их на 90° . Перед установкой предфильтра М80 желтое защитное кольцо на нем снимается, после чего его крепление к ФТО осуществляется с помощью полозьев (желтого цвета), закрепленных на корпусе ФГО (см. рис.3.30а). Как видно на рис 3.35б, из-за размещения матрицы под металлическим боксом образуется

цель, в которую устремляется неочищенный воздух (и на матрице, и вокруг нее видны отложения грязи). Безусловно такое крепление ФТО и ФГО всего в четырех угловых точках, а также наличие отверстий в корпусе ФТО для фиксации с матрицей, нельзя назвать герметичным или оптимальным. Кроме того, американский производитель этой системы фильтрации обращает внимание потребителей данной продукции на недопущение потери пластмассовых штырей и матриц в процессе монтажа/демонтажа фильтров и попадания их в воздуховод или проточную часть ГТУ.

Некоторые производители воздушных фильтров, такие как финская компания EF и немецкая компания FFT предпочитают осуществлять крепление предфильтров к ФТО с помощью системы Snap-on, состоящей из штырей на корпусе ФТО и ответных отверстий на ФГО. Если у финской компании в качестве предфильтра используется ФГО класса G4 (Рис.3.31а), то у турецкой компании модульная система (Рис.3.31б) представляет собой связку ФТО F7 и ЕРА фильтра класса E10 согласно ГОСТ Р ЕН 779-2014.



а



б

Рис.3.31. Механизм Snap-on крепления ФГО и ФТО: а - финской компании EF; б - турецкой компании M

Другой финский производитель фильтров компания AF предлагал крепление панельного предфильтра класса G4 путем прижатия его к ФТО с помощью металлической пружины, закрепленной к корпусу фильтр бокса (Рис.3.32). Надо полагать, что эта пружина должна была изготовлена из нержавеющей (легированной) пружинной стали. В противном случае она быстро бы подверглась коррозии, стала искусственным источником загрязнения фильтров и, в конечном итоге, сломалась, приведя к выпадению ФГО из фильтр-бокса.



Рис.3.32. Механизм крепления ФГО в КСФ финской компании AF с помощью пружины.

Выполненный анализ комбисистем фильтрации воздуха отечественных и зарубежных производителей фильтров и КВОУ выявил основные тенденции развития этих устройств:

- 1). Трех и двух ступенчатые комбисистемы;
- 2). Комбисистемы с размещением фильтр-элементов в едином боксе или без него.

На отечественных ТЭЦ используются двухступенчатые комбинированные системы фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ с боксами, изготовленными либо из прочной пластмассы АВС с усиленными ребрами жесткости или из нержавеющей стали, поставленные вместе с КВОУ их производителями (Рис.3.33).



а

б

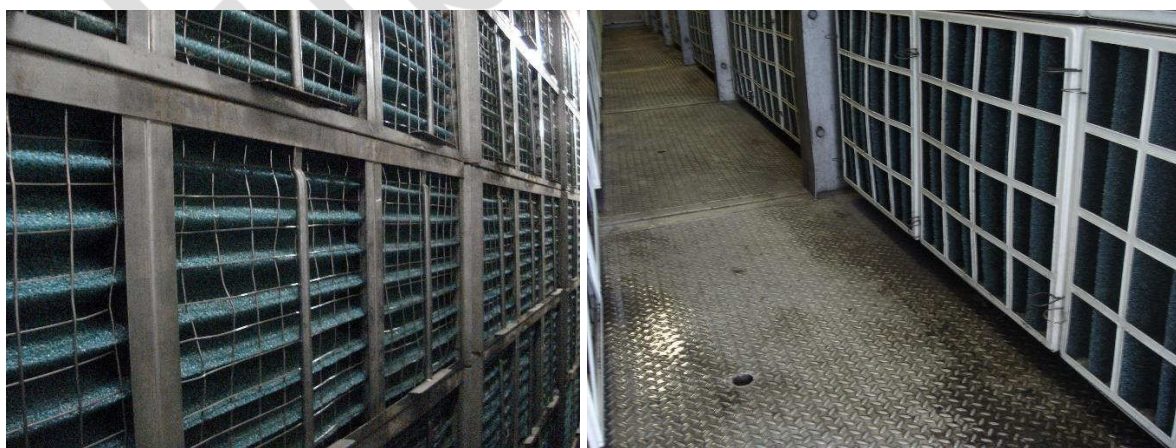
Рис.3.33. Размещение фильтров в фильтр боксах КСФ: а-в пластмассовом корпусе турецкой компании Микропор; б – в корпусе из нержавеющей стали производителя КВОУ немецкой компании FAIST AIS.

Рассмотрим каждый тип фильтров, применяемых в КВОУ по их назначению.

3.2.2. Фильтры коагуляторы Poret

Фильтры коагуляторы, как и погодные козырьки КВОУ, предназначены для предотвращения попадания атмосферных осадков в виде дождя (тумана) и снега, на фильтры последующих ступеней очистки воздуха ГТУ. Исходя из задач, стоящих перед этим типом фильтров, целесообразно, в качестве фильтровального материала для них выбирать синтетический материал, обладающий гидрофобностью (отталкивающий влагу).

Длительное время на отечественных и зарубежных ТЭЦ для очистки циклового воздуха ГТУ от атмосферной пыли и влаги на первой ступени КВОУ использовались и продолжают использоваться фильтры грубой очистки – коагуляторы типа Poret, изготовленные из пены. Имеется широкий выбор полиуретановых пен с открытыми и закрытыми ячейками. Открытие пор в пене осуществляется после ее изготовления в специальном процессе, известном как ретикуляция. Вариатор различных конфигураций используется для изготовления униформы структуры открытых ячеек пены с контролируемым размером пор между PPI 10 и PPI 80 (PPI = Pores per Inch – количество пор на одном дюйме). Предлагается два типа фильтров, изготовленных из пены Polyester и Polyether. Два этих типа пен различны по своей гидролизоустойчивости. Polyester пены лимитированы по применению для контактов с водой. Polyether пены, напротив, устойчивы к гидролизу и другим формам химических и окружающих воздействий. Они успешно используются как уловители тумана, увлажнители воздуха, очистки сточных вод, сохранения рыб в аквариумах и прудах. В качестве коагуляторов (влагоуловителей) на первой ступени КВОУ ГТУ обычно используются **фильтры PPI 10**, изготовленные из вспененного полиуретана (Рис.3.34). Поставщиком этой продукции является немецкая компания E.



а

б

Рис.3.34. Коагулятор типа Poret PPI 10: а- в виде матов; б- в пластмассовых рамках [19]

Для увеличения площади фильтрации таких коагуляторов используется зигзагообразный (Z –образный) вспененный полиуретан. Кроме этого, вертикальные Z –образные складки позволяют ориентировать дождевые атмосферные осадки сверху вниз по фильтровальному материалу и дальше отводить влагу в дренажную систему КВОУ. На рис.3.18а зафиксирована неправильная установка фильтров матов Poret PPI 10 в КВОУ энергетической ГТУ.

Технические характеристики фильтров коагуляторов типа Poret приведены в табл.3.5.

Табл.3.5. Технические характеристики коагулятора Poret PPI 10 GTU, G2, Z-line

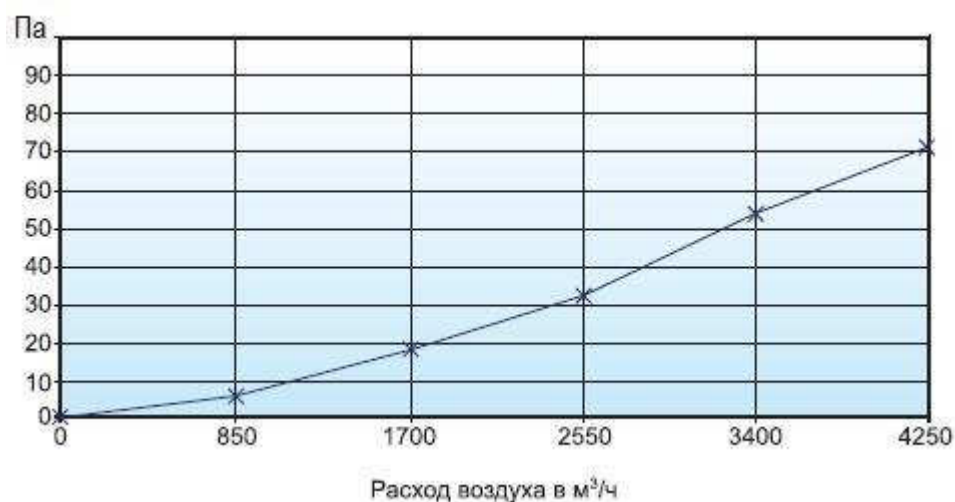
N	Наименование параметров	Величина параметра
1	Номинальный расход воздуха, м ³ /ч	3400
2	Перепад давления, Па -начальный -конечный	38 250
3	Площадь фильтрации, м ²	0,35
4	Класс очистки	G2
5	Фильтрующий материал	Вспененный полиуретан
6	Водонепроницаемость, %	100
7	Эффективность захвата 10 мкм капель, %	99
8	Эффективность захвата пыли	Низкая
9	Температура использования, °С	до 80
10	Габаритные размеры (ШхВхД), мм	592x592x94

Согласно паспортным данным у этих фильтров гарантийный срок эксплуатации составляет не менее 3 месяцев со дня ввода в эксплуатацию, кроме случаев повышенной запыленности атмосферного воздуха. Производители этой продукции особо отмечают, что данный тип фильтров-коагуляторов, изготовленный из пористого полиуретана, может регенерироваться (мытья) несколько раз (не более 8). Класс очистки таких фильтров, обычно не превышает G2, а конечный перепад давления на фильтрах грубой очистки не должен превышать 250 Па согласно ГОСТ Р ЕН 779:2014.

На web-сайте производителя этой продукции немецкой компании E сказано, что эффективность захвата пыли таких фильтров низкая. Для уточнения количественного показателя эффективности нами было выполнено тестирование нового фильтр – мата размерами 610x610x75 мм, класса G2. На рис.3.35 представлены кривые фракционной эффективности и перепада давления в зависимости от расхода воздуха через фильтр [19].



а)



б)

Рис.3.35. Результаты тестирования фильтра- коагулятора Poret PPI 10 на: а- эффективность; б- начальный перепад давления

Как видно из представленных графиков эффективность улавливания частиц фильтром действительно небольшая и заметный эффект появляется для частиц размером 2 мкм. 100% эффективность достигается для частиц более 5 мкм.

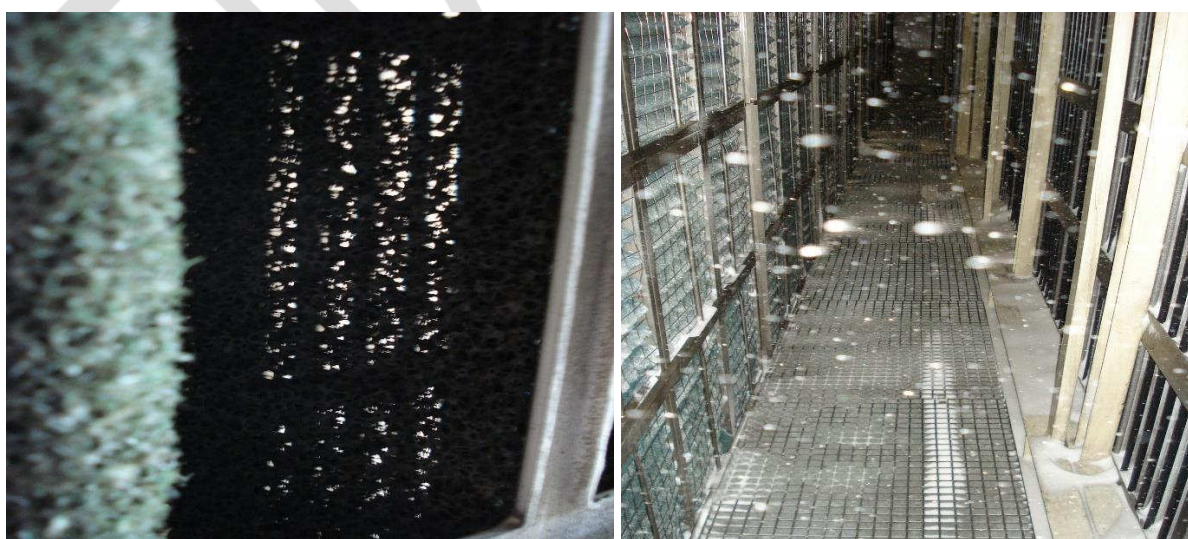
Начальный перепад давления для расхода воздуха 3400 м³/ч составил 53 Па, что превышает данный параметр, приведенный в табл.3.5, несмотря на то, что площадь фильтрации протестированного образца больше размеров, приведенных в паспорте фильтра. Известно, что чем больше площадь фильтрации, тем меньше начальный перепад на фильтре.

Опыт эксплуатации этого типа фильтров коагуляторов показал, что производители данной продукции поставляют маты, как с вертикальной, так и горизонтальной установкой Z - линий вспененного полиуретана. Объяснение такого изготовления фильтр - матов поставщиком сводится к тому, что ориентация зигзагообразных складок не влияет на

работу коагуляторов. Однако, поставка этих же фильтров матов в пластмассовой рамке, показывает несостоятельность такого объяснения (см. рис.3.34б).

ГОСТ Р ЕН 779:2014 гласит, что если правильная установка фильтра в воздуховод неочевидна, то в маркировке необходимо указать направление потока воздуха и верх фильтра (TOP-верх). Поставщик такой продукции, выполняя это требование стандарта, указывает “TOP” именно так, чтобы фильтр был установлен в КВОУ с вертикальным расположением Z - линий вспененного полиуретана. Такую же информацию можно найти и на Web –сайте производителя этой продукции. Таким образом, объяснение поставщика этой продукции, что эффективность влагоудаления идентична при горизонтальной и вертикальной установке зигзагообразного фильтровального материала не соответствует действительности. Просто имеет место тривиальная ошибка производителя этой продукции при разделке (cut –to-size section) пористого полиуретана и не соблюдение ориентации Z – линий.

Как показал опыт эксплуатации, отвод атмосферной влаги при вертикальной установке зигзагообразного вспененный полиуретан осуществляется быстрее, чем при горизонтальном размещении, поскольку отводимой влаге не нужно преодолевать гофры Z - линий фильтровального материала. Также было установлено, что уже после первой регенерации фильтровальный материал начинает выкрашиваться и разрушаться. Поры в фильтровальном материале увеличиваются в размерах (Рис.3.36а) и через них в КВОУ начинает поступать большое количество частиц пыли и атмосферных осадков, эффективность воздухоочистки резко снижается.



а

б

Рис.3.36. Poret PPI 10: а-поры после регенерации; б- проникновение снега через поры [19]

На рис.3.34б отчетливо видна лужа воды за коагуляторами, изготовленными из пенистого полиуретана с вертикальной ориентацией Z – гофр. Поэтому приведенные в табл.3.5 паспортные данные фильтра коагулятора о 100% водонепроницаемости не соответствуют действительности. На рис.3.34б зафиксировано, что фильтр из пористого полиуретана не только пропускает атмосферную влагу, но и снег, что приводит к заносу и блокировке фильтров второй ступени КВОУ. Дросселирование воздушного потока снегом ведет к резкому росту перепада давления в КВОУ, уменьшению расхода воздуха на входе в компрессор, следствием чего является недовыработка электроэнергии ГТУ или перерасход топлива при выполнении диспетчерского графика системного оператора.

Многолетний мониторинг загрязненности воздуха на всасе КВОУ ГТУ ПГУ, позволил в полной мере оценить эффективность и целесообразность использования фильтров коагуляторов из пористого полиуретана в различные сезонных климатических условиях эксплуатации.

В табл.3.6. представлены результаты замеров на всасе КВОУ и за коагулятором Poret PPI 10 GTU, класса G2. Как видно из представленных данных, общее количество частиц за коагулятором на 2,6 млн. частиц/м³ больше, чем на всасе КВОУ, а концентрация частиц на 719 мг/ м³. Согласно ГОСТ Р ЕН 779:2014 отношение концентраций частиц после фильтра и до него называется «проскоком».

Сравнение результатов замеров на всасе КВОУ и за коагулятором Poret PPI 10 (на 20.07.2017 г.)						Таблица 3.6
Размер частиц, мкм	Количество частиц на м ³ для конкретной дисперсности		Отношение количества частиц за/перед коагулятором	Концентрация частиц, мг/м ³		Проскок
	на всасе КВОУ	за коагулятором		на всасе КВОУ	за коагулятором	
0,3	15353360	14812720	1,0	1	1	1
0,5	2051590	2453710	1,2	1	1	1
1,0	512014	1472792	2,9	3	10	3,3
3,0	44523	902474	20,3	3	69	23
5,0	17314	867484	49,8	8	399	49,9
10,0	3534	121201	34,3	8	263	32,9
Всего	17982330	20624380	1,1	24	743	31

При идеальном процессе фильтрации каждая частица должна постоянно задерживаться при первом столкновении с фильтрующей поверхностью, такой как волокно фильтра, или с ранее задержанной частицей. Для мелких частиц и низких скоростей воздуха силы адгезии значительно превышают кинетическую энергию движущихся частиц в воздушном потоке, и частицы пыли, которые уже уловлены, вряд ли будут вынесены из фильтра.

Однако если эффективных контактов с волокном не последует, то частицы будут вынесены из фильтра, что приводит к уменьшению эффективности для частиц в этом размерном диапазоне.

Кроме того, в табл.3.6 приведены сравнительные данные замеров на всасе КВОУ и за фильтром Poret PPI10 по дисперсному составу частиц. Приведено соотношение количества частиц перед ним и за ним, а также «проскок» частиц через фильтр. Как видно из представленных данных отношение количества и концентрации частиц за коагулятором и перед ним увеличиваются пропорционально. «Проскок» частиц размером 0,3 - 0,5 мкм не был зафиксирован (равен 1), следовательно, эти частицы беспрепятственно проходят через фильтр коагулятор, что естественно, для класса очистки G2.

Начиная с дисперсности 1,0 мкм, происходит резкий рост величины «проскока» и отношения количества частиц. Максимальный экстремум этих величин зафиксирован для частиц размером 5,0 мкм. Величина «проскока» равная 49.9, говорит о скачкообразном насыщении (повышении концентрации) воздушного потока за счет частиц этого размера, вытесненных из коагулятора PPI10. Среднее значение (отношение суммарных значений) «проскока» равно 31, что ведет к резкому увеличению пылевой нагрузки фильтров второй ступени КВОУ и сокращению их срока службы.

Если количество задержанной пыли на фильтре увеличивается, то проявляются следующие дополнительные эффекты:

- а) влетающая частица может ударить по ранее захваченной частице и выбить ее в воздушный поток;
- б) скорость воздуха в фильтрующем материале увеличивается из-за уменьшения пространства для прохода воздуха захваченными частицами. Кроме того, фильтрующий материал может сжаться из-за увеличения сопротивления воздушному потоку, и таким образом стать причиной дополнительного увеличения скорости воздуха в воздушных каналах. Это увеличение скорости воздуха может унести некоторые осажденные частицы;
- в) колебания фильтрующего материала при работе фильтра вызывают перераспределение пыли, задержанной фильтрующим материалом. Колебания приводят к возрастанию уноса пыли.

Как видно из представленных фактов коагуляторы типа Poret не обладают необходимой эффективностью очистки воздуха от загрязняющих частиц и атмосферных осадков. Следует задаться вопросом: почему такое длительное время эти фильтры находили и находят применение на отечественных ТЭЦ? Ответ прост – обещанная производителем возможность регенерации вспененного полиуретана и снижение затрат на закупку новых

фильтров, а также отсутствие мониторинга за их работой. Хотя на многих электростанциях стали замечать, что эффективность этих фильтров после регенерации падает раз от раза. При этом, эти фильтры зарекомендовали себя хорошо во время весеннего цветения растений и появления двукрылых насекомых. Как известно, тополиный пух в весенне-летний период эксплуатации ГТУ доставляет большое беспокойство персоналу ТЭЦ, а фильтры из полиуретана достаточно быстро моются и снова готовы для использования.

В процессе эксплуатации было замечено, что после образования слоя тополиного пуха на коагуляторе из полиуретана, он начинает улавливать большее количество пыли. На рис. 3.37а изображен фильтр коагулятор в рамке при достижении предельного перепада давления в 250 Па. На нем отчетливо видно большое количество тополиного пуха, а сверху частицы пыли, задержанные с его помощью. Но, в этом случае поры вспененного полиуретана закрыты пухом и не выполняют своего предназначения.

Однако, одним из самых серьезных из перечисленных недостатков фильтров из вспененного полиуретана является их набухание атмосферными осадками и выпадение из пластмассовых рамок и ячеек КВОУ ГТУ (Рис.3.37б).



а

б

Рис.3.37. Фильтры Poret PP1 10: а- заблокированы тополиным пухом; б- выпадение из ячеек КВОУ [19]

Следует обратить внимание, что вспененный полиуретан является пожароопасным материалом, поэтому для снижения вероятности воспламенения его стали покрывать меламином, температура плавления которого составляет примерно 350⁰С. Это новшество в производстве фильтров коагуляторов появилось после пожара, возникшего на одной из

зарубежных ТЭЦ во время сварочных работ. После попадания искры вспененный полиуретан воспламенился, начался пожар, в результате которого КВОУ ГТУ полностью выгорело (Рис.3.38а) [19].

Покрытие коагуляторов из вспененного полиуретана меламином может относительно повысить безопасность эксплуатации только до первой регенерации (помывки) фильтров. Как отмечалось ранее, производитель такой продукции, рекомендует осуществлять регенерацию таких фильтров до 8 раз. Уже после первой регенерации, защитная пленка покрытия меламином (если она была нанесена) разрушается и фильтры, изготовленные из полиуретана, становятся пожароопасными. Об этом должны знать и помнить все пользователи данной продукции. Тем более, после пожара на КВОУ Ивановских ПГУ в 2021 г, произошедшее также во время сварочных работ [20].



а



б

Рис.3.38. Пожары, вызванные возгоранием фильтров коагуляторов Poret PPI 10:
а – зарубежное КВОУ; б- КВОУ на Ивановских ПГУ.

По трагическому стечению обстоятельств на обоих КВОУ, в качестве коагуляторов, были установлены фильтры Poret PPI 10.

В заключении к сказанному целесообразно отметить следующее:

1. Коагуляторы, изготовленные из пористого полиуретана, не обладают необходимой эффективностью очистки воздуха от загрязняющих частиц и атмосферных осадков.
2. Пористый полиуретан является горючим материалом, при эксплуатации которого необходимо соблюдать меры пожаробезопасности.

3.2.3. Панельные и карманные фильтры коагуляторы

Большинство производителей и поставщиков воздушных фильтров на объекты электроэнергетики нашей страны обращались к иностранным производителям ГТУ с просьбой аттестовать их продукцию для дальнейшего использования в КВОУ. Типовой ответ на эти просьбы лаконично сформулирован в информационном письме одного из ведущих поставщиков энергетических ГТУ на российский рынок: «Сертифицированные Siemens AG компании производители КВОУ для ГТУ определяют самостоятельно поставщиков фильтр – элементов к ним».

Компания FAIST AIS (ФРГ) является аттестованным поставщиком воздухозаборных трактов для ГТУ фирмы Siemens AG. Некоторое время назад компания FAIST AIS выпустила ряд Technical Information Letter (TIL) -Технических Информативных Писем, в которых дала новые рекомендации по выбору фильтров для КВОУ собственного производства. Как отмечается в этих TIL, данные рекомендации имеют высшую категорию важности равную 5. Подчеркивается, что если пользователи КВОУ не придерживаются рекомендаций, изложенных в этих письмах, то в работе фильтров могут произойти непредвиденные сбои. Поэтому компания FAIST AIS настоятельно рекомендует придерживаться изложенных требований.

В качестве фильтров коагуляторов, предназначенных для удаления атмосферной влаги и устанавливаемых на первых ступенях очистки воздуха КВОУ, компания FAIST AIS рекомендовала использовать панельные и карманные фильтры грубой очистки, изготовленные из полиэстера /синтетического материала [21]. На рис.3.39 изображены рекомендованные воздушные фильтры коагуляторы панельного и карманного типа.

Для повышение эффективности влагоудаления на многих КВОУ энергетических ГТУ, вместо фильтров матов из пористого полиуретана Poret PPI 10 класса очистки G2, были установлены панельные фильтры коагуляторы класса G4.



а



б

Рис.3.39. Воздушные фильтры коагуляторы: а- панельные; б- карманные

С этой целью толщина панельных фильтров коагуляторов класса G4 соответствует толщине фильтров матов Poret PPI 10 - 96 мм. Для повышения эффективности толщина панельных фильтров коагуляторов может достигать 150 мм. Под действием силы гравитации атмосферная влага по гофрированной поверхности стекает вниз, попадает в дренажные стоки, после чего удаляется из фильтра коагулятора. Рамки таких фильтров не должны быть подвержены ржавлению, поэтому изготавливаются или из высокопрочной пластмассы, либо из алюминия.

Помимо панельных фильтров в качестве коагуляторов применяются карманные фильтры. К этим фильтрам предъявляются особые требования: фильтровальный материал – прогрессивная синтетика с добавлением клейкой субстанции, водостойкая с гидрофобной пропиткой (Табл.3.7).

Табл.3.7. Технические характеристики фильтров коагуляторов грубой очистки

	Карманные ФГО	Складчатые (гофрированные) фильтры-коагуляторы:	
		для плановой замены	повышенной эффективности
Габаритные размеры (толщина рамки), мм	592×592 (25)	592×592×96	592×592×150 (с дополнительными направляющими для монтажа)
Материал	высококачественный полиэстер / синтетика	самонесущий полиэстер / синтетика	
Площадь фильтрации, м ² : – при глубине фильтра 190 мм – при глубине фильтра 350 мм	1,4 2,2	2–2,5	2,84
Начальный перепад давления (при расходе 3400 м ³ /ч), Па	<50	<80	<80
Уплотнитель	бесшовный полиуретан	на боковых гранях плоский (либо рамки с направляющими)	
Материал рамки	пластик	пластик или алюминий	
Конструктивные особенности	карманы термоязные, без прошивки	складки материала должны быть равномерно разделены термоклеевыми или пластиковыми сепараторами	

Карманы фильтров- термопаянные, самонесущие (самоустанавливающиеся), без прошивки. Форма карманов должна обеспечивать отвод атмосферной влаги из фильтра в сторону грязного воздуха.

Установленные на первой ступени фильтрации коагуляторы, должны улавливать не только атмосферную влагу, но и крупнодисперсную пыль, содержащуюся в окружающей среде. С этой целью для увеличения площади фильтрации, а, следовательно, пылеемкости фильтра и его жизненного цикла, применяются карманные фильтры, обладающие свойствами коагулятора.

Одним из таких карманных фильтров коагуляторов является фильтр, изготовленный по технологии Drop –Safe (DS). Помимо того, что в нем соблюдено требование отвода атмосферной влаги на грязную сторону воздуха, донная часть карманов гидроизолирована во избежание утечек влаги. Известные фильтры DS имеют два типа размеров карманов: 300 мм и 620 мм. Класс очистки фильтров, в зависимости от их назначения (коагулятор/ фильтр промежуточной ступени) варьируется от G4 до M6. Эффективность удаления влаги фильтрами DS-G4-300 и DS-G4-600 составляет 99,7%, а фильтры DS- M5(M6)-600 – 99,9%. Технология DS запатентована компанией Filtair BV (Нидерланды) и на данный момент является лучшей известной системой отвода влаги из карманных фильтров.

На рис.3.40 изображены карманные фильтры, изготовленный по технологии Drop –Safe, а также принцип улавливания и отвода влаги на грязную сторону воздуха.

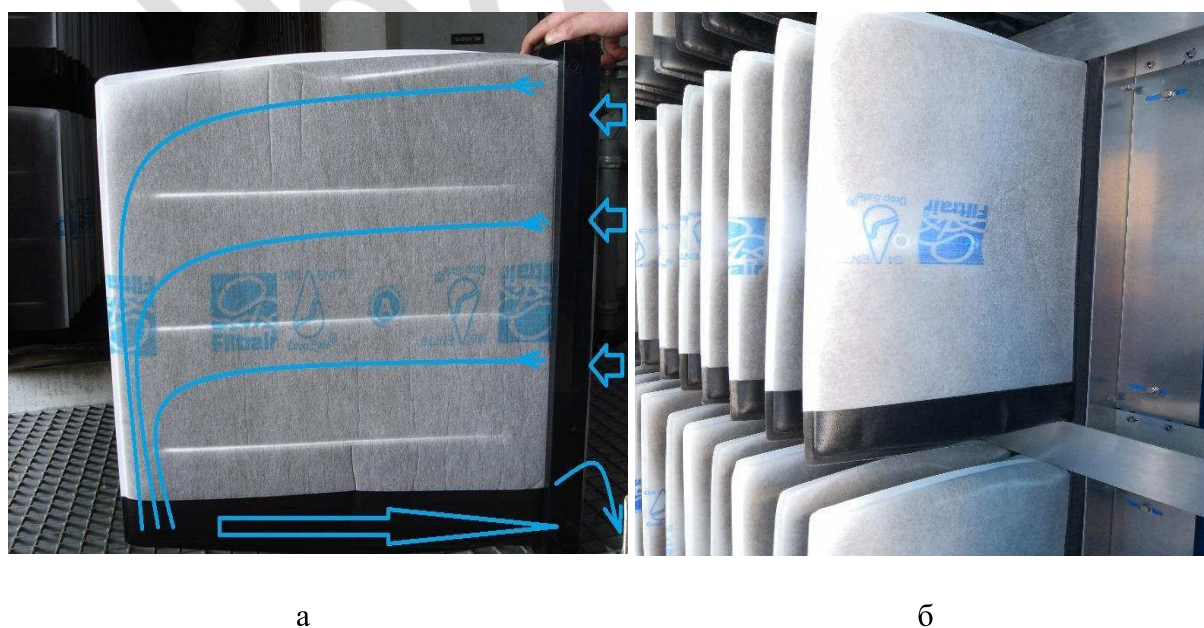


Рис.3.40. Карманный фильтр, изготовленный по технологии DS: а- 620 мм; б-300 мм.

Атмосферная влага вместе с потоком воздуха поступает в карманы фильтра, где по начертанной траектории оседает на фильтровальный материал, коагулируется и дренирует в гидроизолированную донную часть карманов. Такие фильтры были установлены в КВОУ энергетических ГТУ на отечественных ТЭС в Санкт-Петербурге (Рис.3.40а) и Грозном (Рис.3.40б), где показали свою высокую эффективность.

В феврале 2017 года в Великобритании на базе лаборатории независимой фирмы (не занимающейся производством воздушных фильтров) авторами книги при участии представителя компании FAIST AIS (ФРГ) были проведены статические и динамические испытания воздушных фильтров ряда известных производителей этой продукции [22]. Динамическим испытаниям были подвержены фильтры коагуляторы, предназначенные для предотвращения поступления атмосферной влаги в КВОУ ГТУ. Эти испытания представляли собой тестирование фильтров водяным туманом, образующегося в результате подачи распыленной воды через форсунки. Целью этих испытаний являлось выявление коагуляторов различных производителей с фильтровальным материалом, имеющим наибольшую резистентность влаге.

На Рис.3.41а изображен испытательный стенд, на котором было выполнено тестирование фильтров коагуляторов, и форсунки, осуществляющие распыл воды (Рис.3.41б).



а

б

Рис.3.41. Испытательный стенд: а- внешний вид; б- форсунки для распыла воды

Форсунки расположены на расстоянии 2,6 метра от места установки фильтра на стенде для образования водяного тумана перед образцом. Вода к форсункам подавалась с помощью насоса. Дренаж использованной воды осуществлялся в две отдельные емкости: первая – отвод влаги на входе в образец (грязная сторона фильтра), вторая – вода, проникшая через образец (чистая сторона фильтра). Облицовка испытательного стенда

органическим стеклом позволяла осуществлять визуальный контроль процесса отвода влаги и ее проникновение через фильтровальный материал образца и его стык с рамкой фильтра. Помимо этого, момент протечки воды через фильтр элемент фиксировался видео и фотоаппаратурой.

Тестирование образцов фильтров осуществлялось при расходе воздуха 3400 м³/ч. При этом расходе проверялся начальный перепад давления на фильтрах, указанный в их паспортах или на официальном Web сайте компании производителя данной продукции. В момент подачи воды к форсункам, включался отсчет времени проведения теста на водостойкость фильтра. Расход воды через форсунки составлял 2 литра в минуту. Ценность этих испытаний заключалась в их объективности, поскольку на одном и том же стенде независимой компании, в одинаковых климатических условиях, по одной методике были протестированы фильтры различных производителей, отличающихся, радиальными размерами и классом очистки. Параметры, испытанных фильтров, которым присвоены условные обозначения, представлены в Таблице 3.8.

Табл.3.8. Технические параметры испытанных фильтров

Обозначение образца фильтра	Класс очистки	Тип фильтра	Размеры фильтра (мм)	Состояние фильтра	Тип фильтровального материала*
Е	G4	панельный	592x592x96	новый	Синтетика
FA	M6	карманный	595x595x620	использованный	Термоскрепленное синтетическое волокно для технологии Drop-Safe
FFT	M6	карманный	592x592x650	новый	Многослойный нетканый материал с прогрессивной структурой из прочных синтетических нитей
M1	G4	панельный	592x592x150	новый	Водоотталкивающая синтетика
M2	M5	панельный	592x592x96	новый	Водоотталкивающая синтетика
VA	M5	панельный	592x592x150	новый	Водоотталкивающая синтетика

Кратко проанализируем характеристики данных фильтров коагуляторов. Как видно из табл.3.8 большинство производителей фильтров указывают, что для изготовления фильтров коагуляторов они используют водоотталкивающую синтетику.

Определение водостойкости материала осуществляется по европейскому стандарту EN 20811 «Метод определения водостойкости. Испытание гидростатическим давлением», утвержденному в июне 1992 года [3]. Гидростатическое давление, выдерживаемое тканью, является мерой сопротивления проникновению воды через ткань. В стандартных условиях точечную пробу ткани с лицевой стороны подвергают действию постоянно увеличивающегося давления воды до тех пор, пока проникновение не произойдет в трех точках. Давление, при котором на поверхности пробы появилась третья капля воды, фиксируется. Результат находится в прямой зависимости от свойств тканей, которые подвергаются действию давления воды в течение коротких и средних периодов времени.

Мы рекомендуем отечественным производителям воздушных фильтров, импортирующих фильтровальные материалы для изготовления своей продукции, осуществлять контроль водостойкости купленной ткани по европейскому стандарту EN 20811.

Для получения корректных результатов в процессе тестирования пробы необходимо соблюдать ряд важных требований: климатические условия испытаний, температуру и скорость увеличения подачи воды на образец, правильность подготовки пробы к испытаниям. Например, использование воды с более высокой температурой, чем рекомендовано, даст пониженное гидростатическое давление, величина падения которого зависит от вида ткани.

При подготовке к испытанию пробы ткани как можно меньше деформируют, избегая образования складок и заминов. Гладить пробы для улучшения ее поверхности не допускается. Для испытания необходимо отобрать минимум пять проб из различных мест ткани так, чтобы они представляли материал максимально полно.

Не допускается проводить испытания на поверхности с глубокими заломы или следами складок.

Как показал опыт отечественных производителей фильтров по испытанию образцов фильтровального материала по этому стандарту, именно через глубокие заломы и следы складок на ткани в первую очередь происходят протечки воды, используемой при тесте на водостойкость. Применение гидрофобных материалов в фильтрах коагуляторах приводит к изменению их воздухопроницаемости. Воздухопроницаемость – это скорость воздушного потока, проходящего через площадь испытываемого образца перпендикулярно его поверхности, при заданных значениях перепада давления и промежутка времени. Межгосударственный стандарт ГОСТ ISO 9237-2013 «Материалы текстильные. Метод определения воздухопроницаемости» устанавливает метод определения

воздухопроницаемости, который может быть применен к большинству видов текстильных материалов, включая ткани технического назначения, нетканые материалы, войлок и других материалов, обладающих воздухопроницаемостью. Он идентичен международному стандарту ISO 9237:1995 "Textiles – Determination of permeability of fabrics to air".

Испытание образцов производят в стандартных климатических условиях согласно ISO 139:2005 [4].

Для испытания рекомендуется следующие начальные условия:

- площадь испытываемой поверхности 20 см² ;
- перепад давления 200 Па – для технических материалов.

Для примера приведем результаты замеров, выполненных на установке XHF-01C-A (Fabric Air Permeability Tester), по определению воздухопроницаемости обычного и гидрофобного нетканых материалов одинакового класса очистки G4 и плотности при перепаде давления в 200 Па (Рис.3.42).



Рис.3.42. установке XHF-01C-A (Fabric Air Permeability Tester)

Как видно из табл.3.9 воздухопроницаемость гидрофобного материала ниже этого показателя для обычного материала на 36,7 %.

Табл.3.9. Воздухопроницаемость фильтровального материала

№	Наименование материала	Класс очистки	Плотность, гр./м ²	Воздухопроницаемость, м ³ /м ² /ч
1	Обычный	G4	200	12592,8
2	Гидрофобный	G4	200	7974

Для первой ступени фильтрации, компанией FAIST AIS рекомендуется использовать панельные складчатые (гофрированные) фильтры коагуляторы: для плановой замены, фильтр элементы размером 592x592x96 мм и для повышенной эффективности – размером 592x592x150 мм с повышенной площадью фильтрации. Поэтому для тестирования этого типа фильтров были выбраны образцы двух типоразмеров и классов эффективности- G4 и M5.

Интересным представляется сравнение панельных фильтров разных производителей не только по выше перечисленным параметрам, но и по способам отвода отсепарированной влаги от представленных образцов.

На Рис.3.43а изображен образец панельного фильтра коагулятора E класса G4. На рамке образца в нижней ее части хорошо видны отверстия, предназначенные для отвода атмосферной влаги, поступающей в фильтр. Недостаток этого способа очевиден - сверление отверстий в рамке фильтра уменьшает ее прочностные свойства.

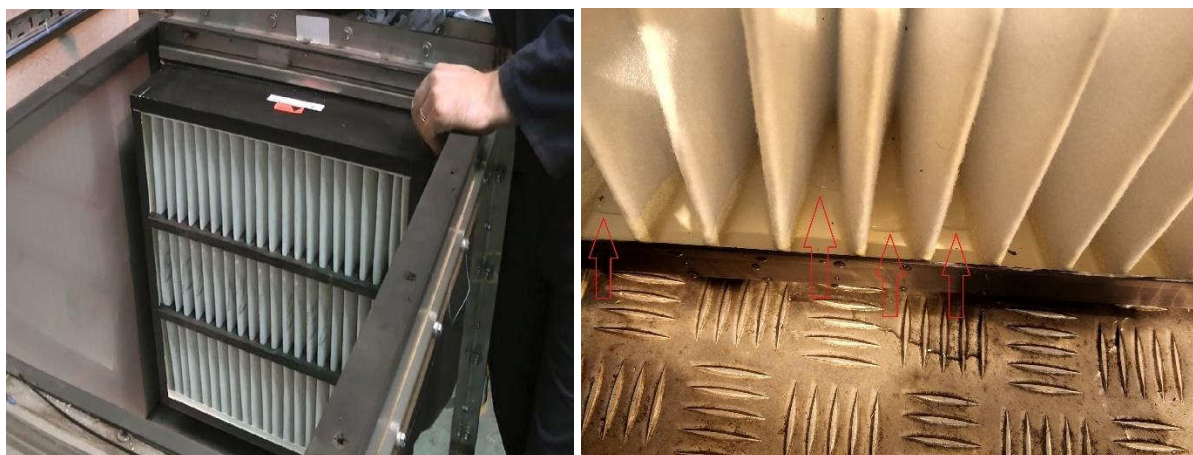


Рис.3.43. Панельные фильтры: а- образец E; б- образцы M1 и M2

На образцах M1 и M2 (турецкой компании Микропор) отвод атмосферной влаги на входе в фильтр осуществляется с помощью наклонных скатов, установленных между гофрами фильтровального материала. В отличие от предыдущего способа дренажа влаги образца E (немецкой компании), данный способ не снижает прочность рамки фильтра, а наклоненные в сторону всаса скаты ускоряют отвод отсепарированной воды от фильтра (Рис.3.43б). Компания FAIST AIS отметила удачную конструкцию дренажа атмосферной влаги на образцах M1 и M2.

Образец VA (международной иностранной компании) не имеет ни тех, ни других способов отвода отсепарированной влаги. Влага отводится с верхней части фильтра вниз

под действием сил гравитации. На Рис.3.44 изображен образец VA, установленный на испытательном стенде.



а

б

Рис.3.44. Образцы фильтров на испытательном стенде: а- «VA»; б- «Е» протечка вода

В соответствии с рекомендациями компании FAIST, у всех представленных образцов, складки фильтровального материала разделены термоклеевыми или пластиковыми сепараторами (Рис.3.43-3.44).

Как отмечалось ранее, при динамическом тестировании образцов фильтров на водостойкость расход воды через форсунки составлял 2 литра в минуту. Перед подачей воды проверялся начальный перепад давления на фильтре при расходе воздуха 3400 м³/ч. В соответствии с паспортными данными начальный перепад давления на образце Е (немецкой компании) составляет 35 Па при данном расходе воздуха. Однако в процессе тестирования было установлено, что фактический перепад давления на фильтре составляет 66 Па, что на 88,6% превышает заявленный производителем этот технический параметр.

На остальных образцах фильтров зафиксированный во время испытаний начальный перепад давления отличался незначительно от данных, указанных на официальных Web сайтах компаний производителей данной продукции (± 2 Па).

При тестировании образца Е на водостойкость протечка воды через фильтровальный материал на чистую сторону фильтра была зафиксирована через две минуты после подачи воды. На рис.3.44б красными стрелками указаны места проникновения влаги.

Для сравнения с образцом Е был протестирован фильтр М2, имеющий те же размеры и аналогичную площадь фильтрации. Тест с подачей распыленной воды продолжался в

течение 15 минут. В этот промежуток времени протечек ваги через фильтровальный материал и его стык с рамкой фильтра не было зафиксировано.

Образцы М1 и VA имеют увеличенные радиальные размеры и площадь фильтрации, по сравнению с предыдущими двумя образцами. Протечка влаги через фильтр элемент VA была обнаружена через 3 минуты после начала распыла воды. На Рис.3.45а отчетливо видно, что интенсивное проникновение воды на чистую сторону образца осуществляется не через фильтровальный материал, а через прокладку на его стыке с рамкой фильтра. Это говорит о недостатках в технологическом процессе сборки панельных фильтров производителя данной продукции.



а

б

Рис.3.45. Панельные фильтры: а- образец VA течь воды; б- образец М2 течи воды нет

В отличие от фильтра VA, протечек воды через образец М2 в течение 15 минутного теста не было зафиксировано. Тактильный контроль чистой стороны фильтр элемента показал отсутствие следов влаги (Рис.3.45б). Этот факт говорит о правильном выборе фильтровального материала и качественной сборке панельного коагулятора.

Компания FAIST AIS в своих технических информационных письмах рекомендует для повышения эффективности работы первой и промежуточной ступени фильтрации КБОУ использовать карманные коалесцирующие фильтры, выполняющие одновременно функции фильтров грубой (средней) очистки с дренажными стоками.

Производителем ВЗТ для ГТУ было предложено провести сравнительные испытания двух карманных фильтров средней очистки - коагуляторов класса очистки М6 с аналогичными габаритными размерами. Одни из фильтров был изготовлен по новой технологии DS,

другой, имел прогрессивную трехслойную структуру нетканого материала, который увеличивает свою плотность к стороне чистого воздуха. Фильтры элементы, изготовленные по данной технологии, хорошо себя зарекомендовали в процессе эксплуатации, как фильтры промежуточной ступени очистки циклового воздуха ГТУ, так и коагуляторы.

Для выполнения сравнительных испытаний был взят образец нового фильтра FFT немецкой компании (Рис.3.46а) и изготовленный по технологии DS образец FA (Нидерланды). Тестирование этих фильтров было выполнено, как и для других образцов, при расходе воздуха 3400 м³/ч и подаче воды через форсунки 2,0 литра в минуту.

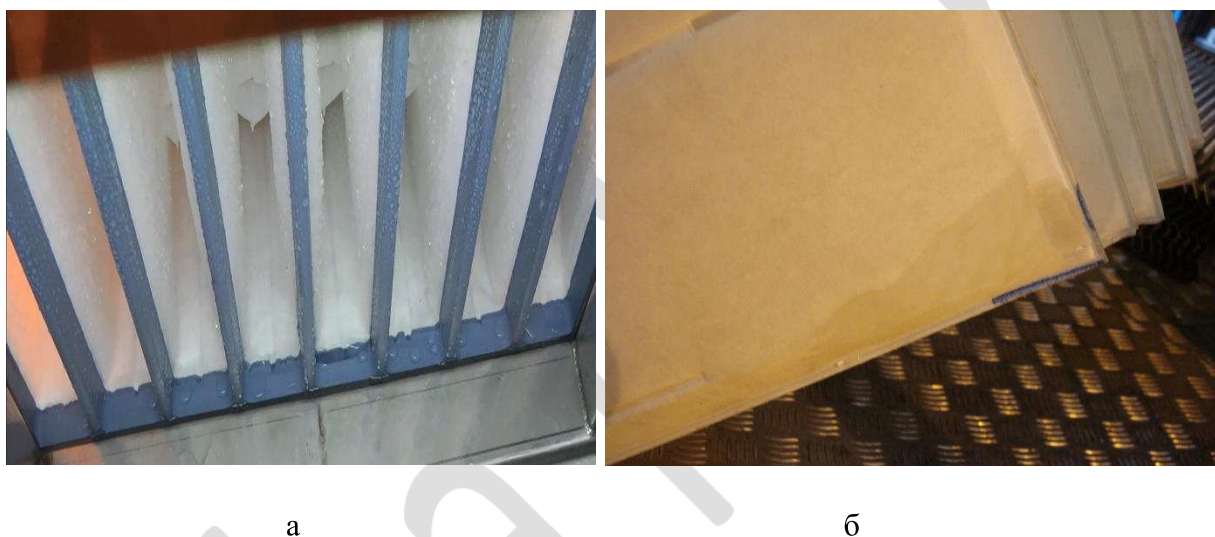


Рис.3.46. Образец FFT на стенде: а- перед началом теста; б- после окончания теста

Через 13 минут испытаний за образцом FFT была обнаружена первая течь воды в нижней части карманов. После 15 минут тестирования фильтр был снят со стенда для осуществления внешнего осмотра. Как хорошо видно на Рис.3.46б, нижняя часть всех карманов фильтра мокрая, что говорит о не высокой гидрофобности фильтровального материала.

Образец FA проработал 18 месяцев на ТЭЦ Mantova в Италии, где обеспечивал очистку циклового воздуха ГТУ AE94. В районе этой ТЭЦ находится множество тополей, которые в период цветения растений образуют большое количество тополиного пуха, поступающего в фильтры КБОУ (Рис.3.47а). Такой выбор использованного фильтра для тестирования был не случаен, поскольку в районе ТЭЦ с ПГУ в Москве так же посажено большое количество тополей и в весенне-летний период эксплуатации энергетики сталкиваются с такими же природными явлениями, что и на итальянской электростанции.

Нам представлялось интересным выяснить, как будет отводить атмосферную влагу фильтр FA, проработавший долгое время в условиях повышенной загрязненности воздуха. Тестирование использованного фильтра FA, изготовленного по технологии DS, продолжалось в течение 30 минут. Видео, фото и визуальный контроль не зафиксировал протечек воды через карманы фильтров (Рис.3.47б), что говорит о высокой резистентности влаге фильтровального материала и эффективной системе дренажа. Кроме того, можно заключить, что даже после длительной эксплуатации фильтра FA в условиях повышенной загрязненности воздуха, фильтр – элемент, изготовленный по технологии DS, не теряет своих гидрофобных свойств.

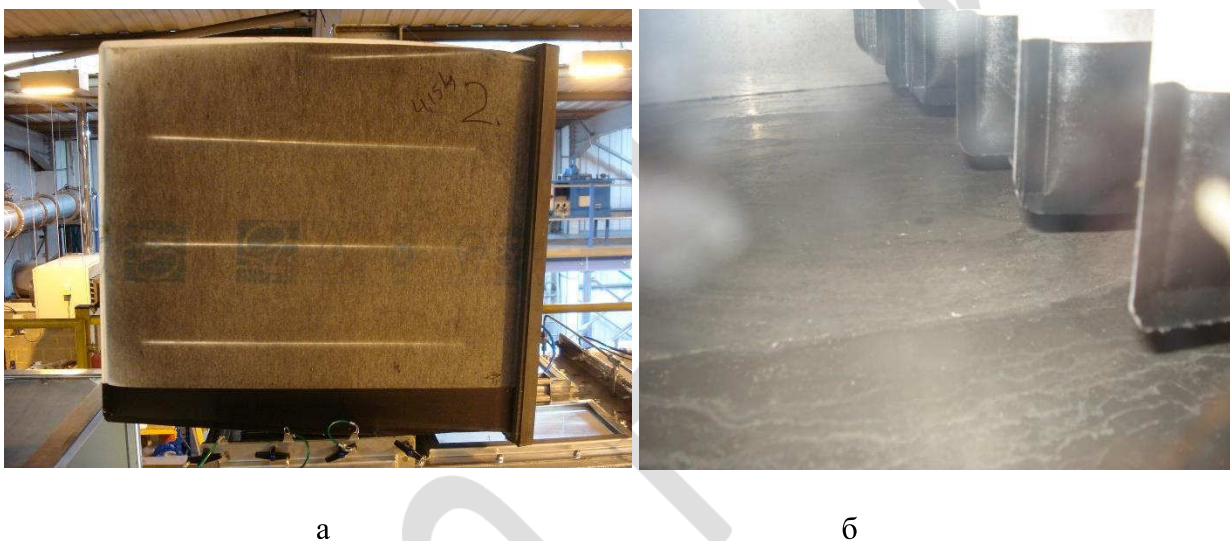


Рис.3.47. Образец FA: а-перед испытаниями; б- состояние после 30 минут испытаний

В таблице 3.10 представлены результаты тестирования представленных образцов фильтров на водостойкость.

Табл.3.10. Водостойкость тестируемых образцов фильтров

Обозначение образца фильтров	Е	FA	FFT	M1	M2	VA
Время до протечки воды (мин)	2	30 Без протечки	13	15 Без протечки	15 Без протечки	3

На основании результатов выполненного тестирования образцов фильтров можно констатировать:

1. Наибольшую водостойкость показали образцы карманного фильтра элемента FA, выполненного по технологии Drop-Safe, и панельные фильтры M1, M2.
2. Фильтровальный материал образца Е, судя по результатам испытаний, обладает

наихудшими гидрофобными свойствами из всех испытанных фильтров. Кроме того, начальный перепад давления, заявленный производителем этих фильтров, занижен по сравнению с фактическими результатами тестирования на 88,6%, что в последующем приведет к снижению выработки электроэнергии ГТУ.

3. Производителю образца VA, следует улучшить технологию сборки панельных фильтров, обратив особое внимание на герметизацию стыков фильтровального материала с рамкой фильтра.
4. При выборе фильтровальных материалов для изготовления фильтров коагуляторов производителям данной продукции рекомендуется тестировать предлагаемую ткань на водостойкость со строгим соблюдением требований стандарта EN 20811:1992.

3.2.4. Карманные фильтры

Как отмечалось ранее, карманные фильтры применяются с целью увеличения площади фильтрации, а, следовательно, пылеемкости фильтра и его жизненного цикла. Лучшим способом достигнуть этой цели является использование объемного фильтрующего материала с высокой пылеемкостью. Такие плотные материалы предназначены для установки в карманных фильтрах. Конструкция кассетного фильтра ограничила бы размер полезной фильтрующей площади, следовательно, такая конструкция не применяется. Хорошие фильтрующие материалы имеют не только объемную, но и прогрессивную структуру. Сторона неочищенного воздуха должна иметь более открытую структуру, чтобы задерживать более крупные частицы, такие как, пыльца и волокна. Ниже по потоку (к стороне чистого воздуха) материал должен становиться более плотным для того, чтобы улавливать более мелкие частицы. На Рис.3.48 показано поперечное сечение фильтрующего материала с прогрессивной структурой, который используется для изготовления фильтров предварительной очистки [25].

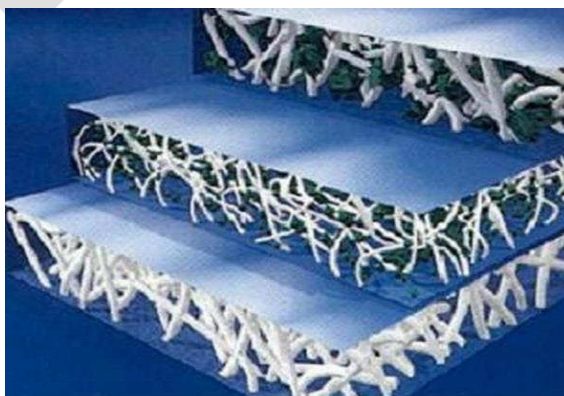


Рис.3.48. Поперечное сечение фильтрующего материала с прогрессивной структурой

Фильтрующий материал этих фильтров имеет прогрессивную трехслойную структуру. Она устроена таким образом, что волокна нетканого фильтрующего материала формируют три слоя, которые увеличивают свою плотность к стороне чистого воздуха. Крупные частицы задерживаются в первом слое, менее плотном слое (в крупных ячейках), более мелкие проникают во второй, более плотный слой (в более мелкие ячейки), а в третьем, наиболее плотном слое, задерживаются самые мелкие частицы соответствующего класса фильтрации. Эта конструктивная особенность позволяет задерживать частицы пыли по всей глубине фильтрующего материала. При обычной же структуре фильтрующего материала основная масса пыли оседает уже в первых слоях, и более глубокие слои фильтра исключены из процесса фильтрации. Это приводит к быстрому забиванию фильтра и резкому росту перепада давления. Кроме того, в обычном фильтре используется только механический способ задержания частиц пыли, путем удара о волокна фильтра.

В трехслойной структуре фильтрующего материала компании FFT используются искусственные волокна активированной поверхностью. Эта активированная поверхность образует липкий слой, который задерживает частицы пыли. Средний слой фильтров заряжен электростатически и притягивает к себе мелкие частицы, имеющие электрический заряд. Эти технологии позволяют фильтру не только улавливать поступающие с воздухом частицы пыли, но и удерживать их внутри материала. При этом частицы пыли налипают на волокна и не препятствуют потоку воздуха, что увеличивает срок службы фильтра. Хотя, в процессе эксплуатации, действие электростатического заряда пропадает.

Конструкция карманных фильтров должна быть разработана на основе современных достижений в области фильтрации воздуха. Рамка фильтра изготовлена из полиуретана, а не из металла. На Рис.3.49 представлены карманные фильтры турецкой компании М.

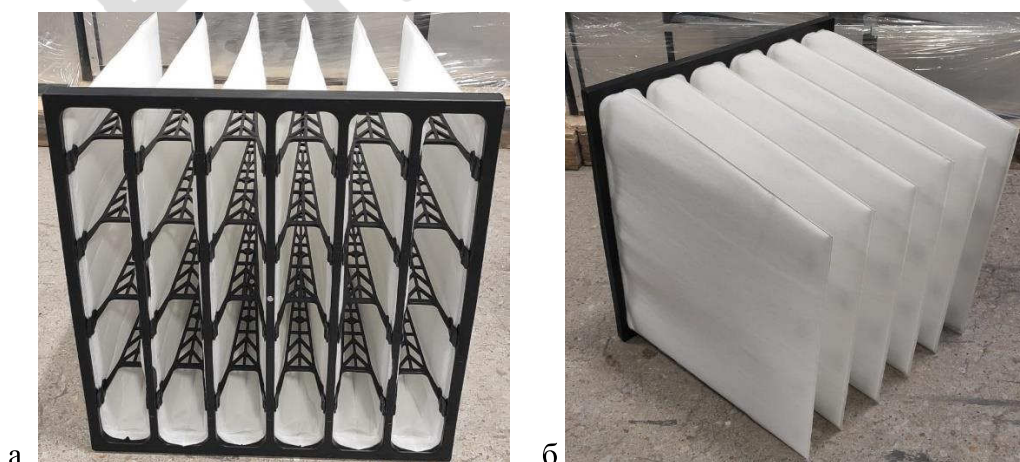


Рис.3.49. Карманный фильтр: а – держатели карманов; б- карманы спаянные

Это значительно облегчает конструкцию фильтра и не ведет к коррозии металла, а, следовательно, к созданию искусственного источника загрязнения циклового воздуха ГТУ. Карманы фильтра должны быть вварены в рамку, а не закреплены механически, как это делается в обычных фильтрах. Такая технология обеспечивает их полную герметичность и увеличивает срок службы. Швы карманов спаяны, а не сшиты как у фильтров обычного исполнения. Это придает фильтру жесткость конструкции и обеспечивает полную герметичность (Рис.3.49б). Материал обычного фильтра не в состоянии обеспечить полноценное задержание частиц пыли диаметром 0.01 мм, поскольку он прострочен иглой диаметром 0.3 мм. Диаметр отверстия от иглы в 30 раз превышает диаметр частицы. Спаянные, термически формованные карманы, специально рассчитанная жесткость фильтрующего материала, держатели зазоров – все эти факторы не дают карманам фильтра провисать даже при большой загрузке пылью и обеспечивают высокую эффективность своей работы (Рис.3.49а). Конструкция этих фильтров обеспечивает равномерную фильтрацию воздуха по всей площади фильтра, что не может обеспечить конструкция обычных фильтров, где провисающие карманы не обеспечивают равномерного поступления воздуха по всей площади (см. рис.3.1).

Если зазор слишком велик (Рис.3.50 в), то поступающий поток воздуха раздувает карманы и внешние стороны карманов прижимаются друг к другу. Воздух перестает проникать в места соприкосновения карманов, и в таком фильтре, работает только задняя часть карманов, передняя же практически исключена из процесса фильтрации.

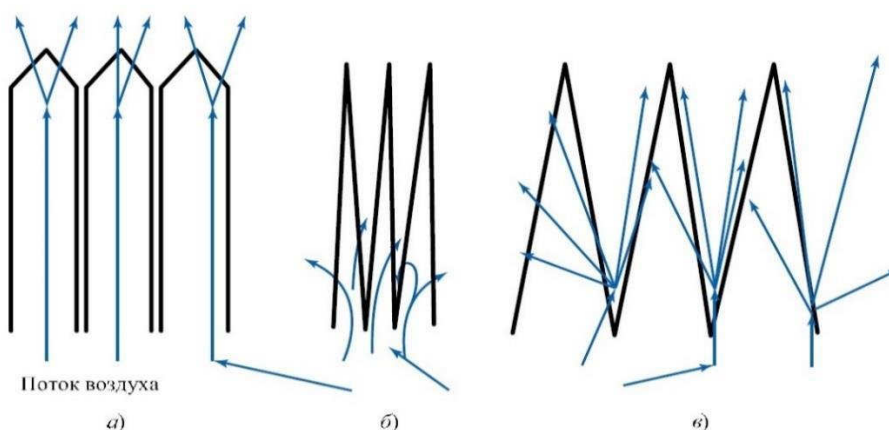


Рис. 3.50. Схема работы карманных фильтров при оптимальном (а), малом (б) и большом зазоре между карманами (в)

Если зазор слишком мал (Рис.3.50б), то воздух не проходит в заднюю часть кармана, просачивается через переднюю стенку фильтра. В данном случае в процессе фильтрации не участвует задняя часть карманов. И только в фильтре (Рис.3.50а) держится оптимальный

зазор, позволяющий потоку воздуха распределяться по всей внутренней поверхности карманов.

Карманные фильтры имеют фиксаторы в карманах для сохранения V-образной геометрии даже в условиях высокоскоростного потока воздуха. Эта особенность является решающей применительно к перепаду давления, пылеемкости и, следовательно, сроку службы самого фильтра. На Рис.3.51 показаны контуры статического давления упрощенного кармана V-образной формы и деформированного кармана, полученные в результате аэродинамического расчета [25].

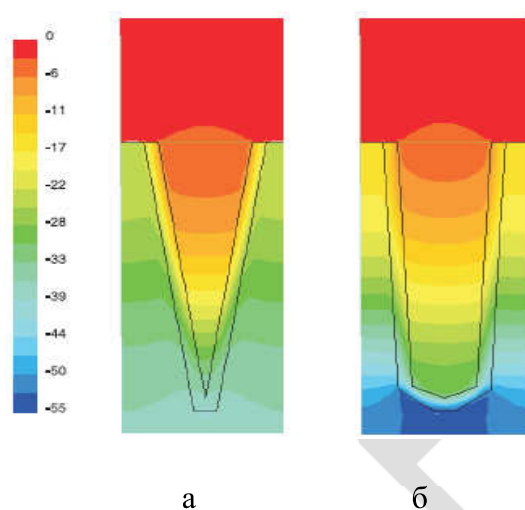


Рис.3.51. Контурсы статического давления кармана: а - V-образной формы; б- деформированного кармана

Для данного условия скорости в 0.83 м/с на один карман, перепад давления в кармане V-образной формы составляет 35.1 Па. При тех же самых граничных условиях деформированный карман имеет перепад давления 50.6 Па. Потеря давления в этом случае увеличивается на 44%, что вызвано лишь деформацией кармана.

Для увеличения пылеемкости и срока службы системы фильтрации циклового воздуха ГТУ, степень предварительной очистки КВОУ оснащают карманными фильтрами с повышенной площадью фильтрации. Увеличение площади фильтрации влечет за собой рост осевого размера фильтров и, следовательно, требование к обеспечению самоподдержки их карманов. Осевой размер карманов больших фильтров ряда производителей достигает величины 600-650 мм.

На Рис.3.52 приведен способ обеспечения самоподдержания карманов фильтров с помощью скрепляющих лент (Рис.3.52а) и пропитки краев фильтровального материала (рис.3.52б) одного из отечественных производителей компании «Ф». Достаточно часто,

карманные фильтры устанавливаются в боксы вместе с фильтрами тонкой очистки (комбисистема). В этом случае, фильтр, изображенный на рис.3.52б, не войдет в бокс в неизменном виде [26].



Рис.3 52. Фильтры: а- фиксация карманов лентой; б – карманы, выступают над рамкой

Карманы этого фильтра будут деформированы на высоту возвышения над рамкой фильтра, что приведет к соприкосновению их друг с другом (см. рис.3.50) и, как следствие, к росту перепада давления (см.рис.3.51).

На Рис.3.53 изображены карманные фильтры в КВОУ, у которых произошел отрыв лент, скрепляющих карманы. Карманы фильтров прижались друг к другу, деформировались, провисли, и произошел их навал на фильтры нижних рядов. Безусловно, что эффективность очистки циклового воздуха такими фильтрами будет крайне низка, а перепад давления на них высок.

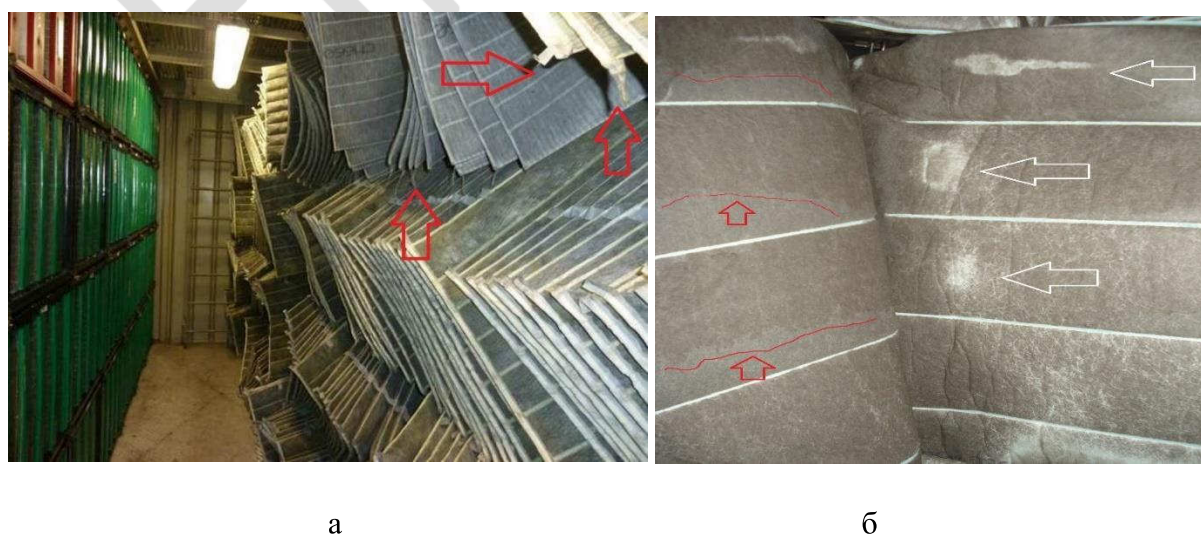


Рис.3.53. Карманные фильтры: а - с оторванными фиксирующими лентами; б-места

слипания карманов

На Рис.3.37б видны места слипания карманов, через которые грязный воздух не поступал, поэтому они отличаются по цвету от другой части фильтровального материала. Отсюда можно заключить, что предложенный способ обеспечения самоподдержки карманов фильтров больших размеров не обеспечивает необходимой надежности в системах фильтрации КВОУ ГТУ.

Другой ошибкой производителя фильтров немецкой компании E являются карманы, не соответствующие размерам рамки КВОУ, в которую они устанавливаются. На Рис.3.54 изображены фильтры, карманы которых умеют увеличенные размеры в радиальном направлении. В результате этого карманы вышестоящих в КВОУ фильтров накладываются на карманы нижестоящих фильтров [26].



Рис.3.54. Неравномерное распределение пыли по карманам фильтра компании E

Карманы деформируются, нарушается оптимальный процесс поступления загрязненного воздуха в них, растет перепад давления на ступени предварительной очистки КВОУ ГТУ. Часть секций карманных фильтров светлые, что говорит о не прохождении через них загрязненного атмосферного воздуха и неучастии в процессе фильтрации. Безусловно, реальная эффективность и пылеемкость таких карманных фильтров ниже, чем это указано в паспортах фильтр - элементов их производителями немецкой компании E.

Конструкцией ВЗТ ГТУ предусмотрена система освещения модулей КВОУ, состоящая из ламп и электрокабелей, идущих от щита подачи электропитания. Трассировка электрических проводов проведена по подволоку модулей КВОУ. Электрические лампы и провода является конструктивным препятствием для установки карманных фильтров больших размеров на верхний ряд КВОУ ГТУ. Несмотря на это, попытки установки таких

фильтров в КВОУ предпринимаются. К чему это приводит хорошо видно на рис.3.55. Нам представляется, что такие действия не требуют комментариев. Хотя учесть конструктивные особенности КВОУ достаточно просто: установить на верхний ряд КВОУ фильтры не 500 мм, а 300 мм. Или осуществить перетрассировку электрических кабелей систем освещения.



Рис.3.55. Смятые карманные фильтры на верхнем ряду КВОУ ГТУ

В зимних условиях эксплуатации КВОУ ГТУ наблюдается забивание (блокировка) длинных карманов фильтром снегом (Рис.3.56). На Рис.3.56а показан уровень заполнения фильтра снегом, а на Рис.3.56б – количество снега, удаленного из фильтра. Через заблокированные снегом фильтры расход воздуха резко снижается, растет перепад давления на них, рабочая точка компрессора приближается к границе помпажа, снижается К.П.Д. энергетической установки и выработка электроэнергии [26].



а



б

Рис.3.56. Карманный фильтр зимой: а-блокирование карманного фильтра снегом; б- количество снега удаленного из фильтра

При сильном снегопаде и неэффективной работе антиобледенительной системы КВОУ возможно вынужденное (не санкционированное системным оператором) снижение нагрузки ГТУ и энергоблоком, а, в крайнем случае, их аварийный останов. Кроме того, наполненные снегом карманы фильтров под действием силы гравитации провисают, возникает значительный “рычаг” между концами карманов и местом их фиксации с рамкой фильтра. Под воздействие возникшей силы, места стыка фильтровального материала с рамкой фильтров рвутся (Рис.3.57а).



Рис.3.57. Повреждение карманов фильтра: а- под тяжестью снега; б- льдом

При эксплуатации воздушных фильтров в зимних условиях при знакопеременных температурах окружающей среды, снег, отложившийся в карманах, при определенных условиях, превращается в лед и повреждает своими острыми краями фильтровальный материал фильтр - элементов (Рис.3.57б). В отдельных случаях происходит поломка и самой рамки от чрезмерной на нее снеговой нагрузки. Попытки укрепить рамки фильтров компании Е с помощью саморезов не приводят к желаемому результату (Рис.3.58а).

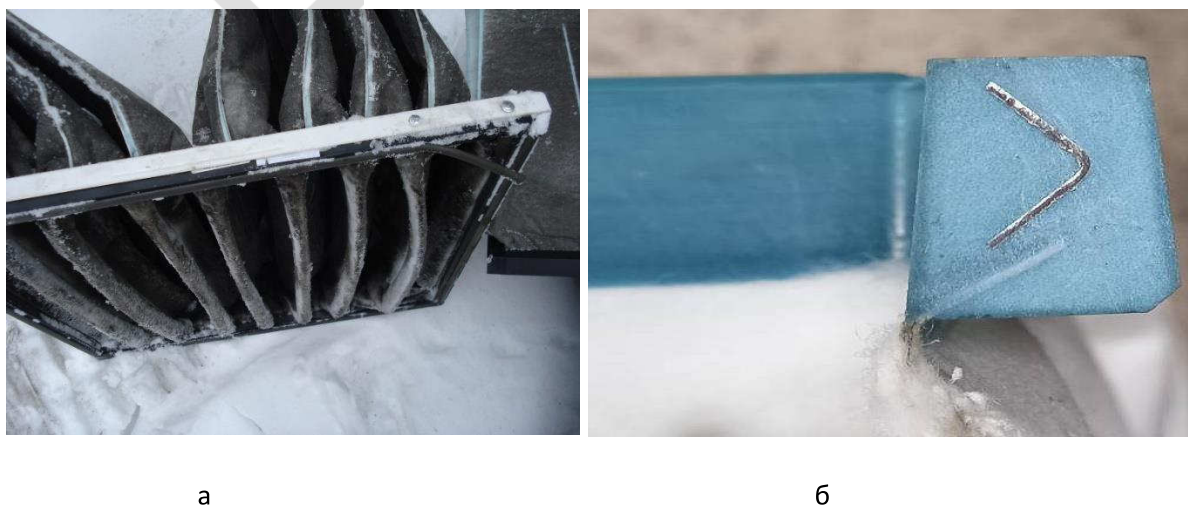


Рис.3.58. Укрепление рамки карманного фильтра: а- саморезами компании Е; б- запрессовкой металлического уголка компании FFT

Следует обратить внимание на то, что такие действия недопустимы, поскольку **фильтры, имеющие нарушение целостности конструкции, должны быть немедленно заменены.**

Другой подход к укреплению рамок карманных фильтров предпринимает другая немецкая компания FFT- запрессовка металлического уголка из нержавеющей стали в пластмассовую рамку фильтра. В результате чего, полностью выполняется требования стандарта и ГОСТ: фильтры должны быть устойчивы к возможным механическим воздействиям во время обычной эксплуатации.

Чего нельзя сказать о фильтрах немецкой компании Е. На рис.3.59. представлены типичные ошибки этой компании при производстве карманных фильтров. На рис.3.59а показан поврежденный во время эксплуатации карманный фильтр в месте соединения рамки фильтра и фильтровального материала. Это говорит о том, что фильтровальный материал не впаян в рамку фильтра. Аналогичная картина наблюдается с другим типом карманных фильтров этого производителя (Рис.3.59б). Отчетливо видно, что фильтровальный материал также не запаян в рамку фильтра, что не обеспечивает требуемую прочность и герметичность фильтра в стыке рамки и фильтровального материала. Уплотнительная прокладка не надежно прикреплена к рамке фильтра, в результате чего возникла протечка грязного воздуха на «чистую сторону» фильтра, что хорошо видно на рис.3.59а.

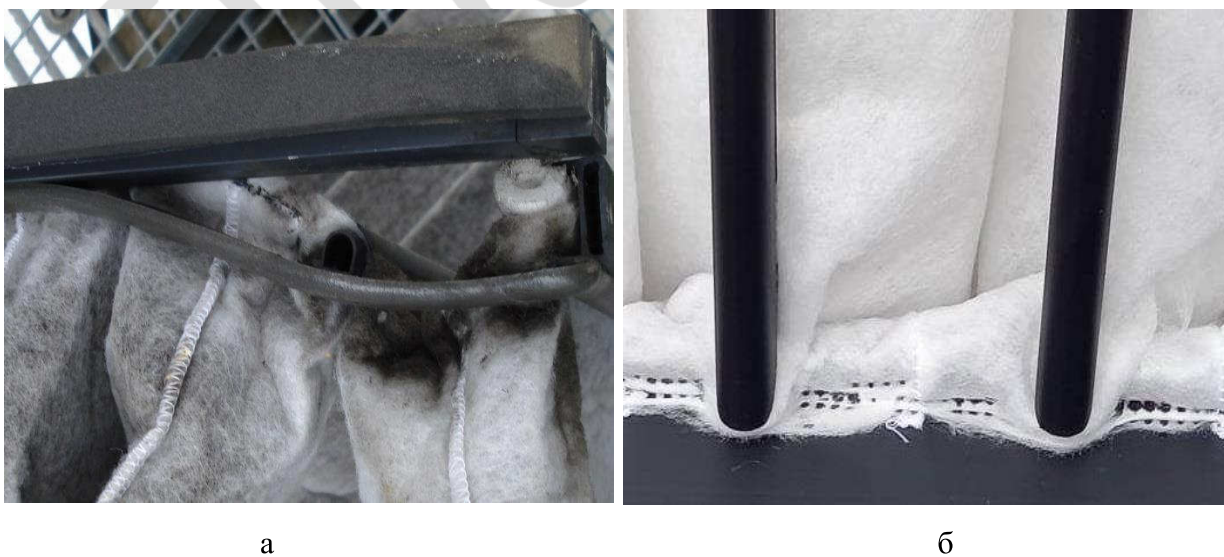


Рис.3.59. Карманные фильтры компании Е: а, б – фильтровальный материал не запаян в рамку фильтра

Другие недостатки карманных фильтров этого производителя зафиксированы на Рис.3.60: прошитые карманы (а), в результате чего, оторвавшиеся в процесс эксплуатации нити (б) и волокна фильтровального материала (в), поступают в фильтры тонкой очистки, стоящие за ними, вызывая их загрязнение.

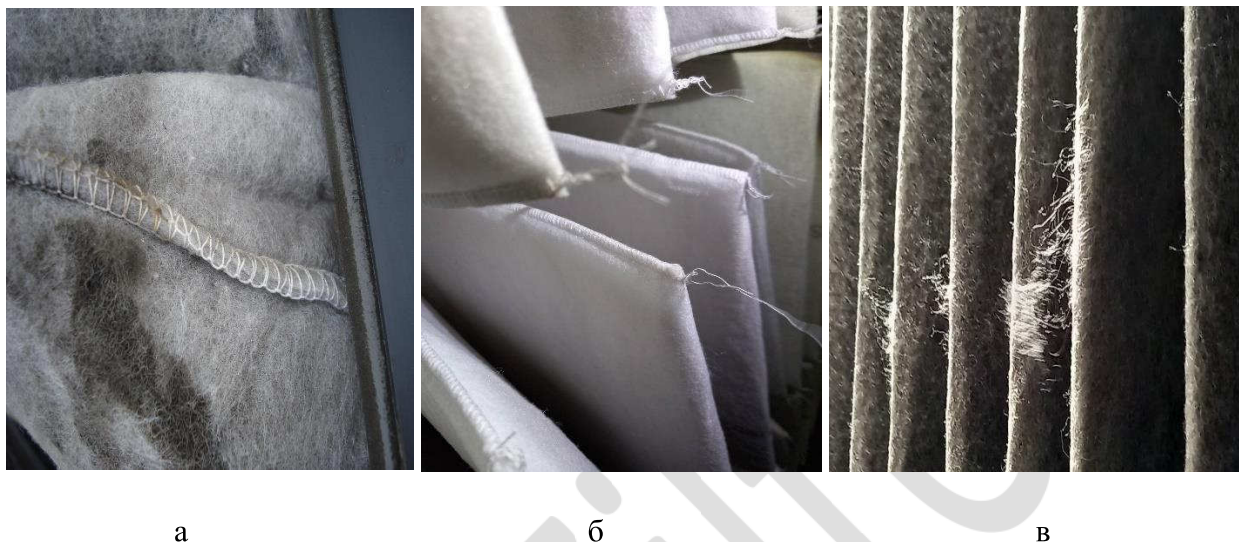


Рис.3.60. Фильтры компании Е: а- прошитые карманы; б- нити прошивки карманов; в- ворс фильтровального материала

Другой проблемой таких фильтров, помимо, неравномерное распределение пыли по карманам фильтра, является использование металлических деталей в конструкции фильтр элементов. На Рис.3.61а красным цветом выделены участки не используемой в процессе очистки воздуха фильтровальной материи и поврежденный участок оцинкованной рамки фильтра со следами коррозии металла [27].

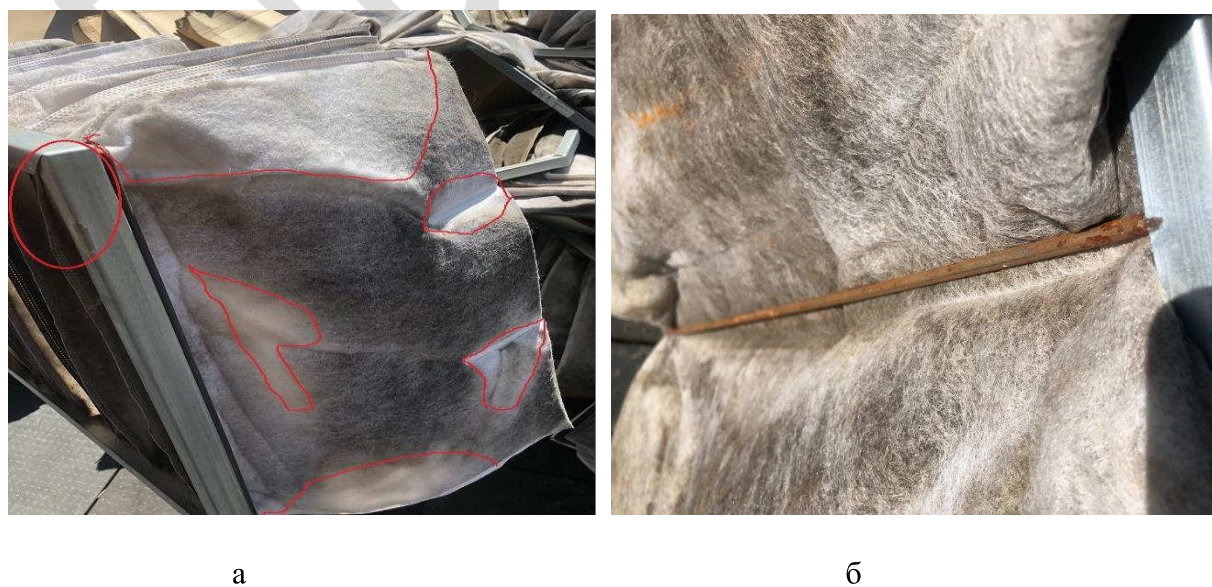


Рис.3.61. Ржавые элементы карманного фильтра: а- рамка; б- разделитель карманов

На Рис.3.61б зафиксирован ржавый разделитель карманов, приваренный к оцинкованной рамке фильтра. Ржавый металл в составе фильтра является рукотворным источником загрязнения циклового воздуха энергетических ГТУ.

Для избегания проблем в зимний период эксплуатации, карманные фильтры могут устанавливаться в КВОУ не только традиционно (карманами вверх по потоку), но и реверсно, т.е. карманами вниз по потоку. Для поддержания карманов в оптимальном состоянии при их реверсной установке к фильтрам другой ступени КВОУ, немецкая компания FFT предлагает металлическую поддерживающую корзину (Рис.3.62) [27]. Безусловно, что такая система фиксации карманов фильтров имеет свои преимущества и недостатки. К положительным факторам следует отнести неизменность положения фильтров, что обеспечивает: равномерное заполнение всех карманов потоком воздуха, обеспечивающее проектную эффективность фильтрации, отсутствие деформации карманов, которая предотвращает повышенный перепад давления на них. В качестве недостатков можно отметить: незначительное повышение перепада давления на фильтрах из-за дополнительного элемента конструкции - металлической корзины, стационарное загромождение сервисной дорожки (прохода) КВОУ, которое невозможно отогнуть при проходе, как обычные карманные фильтры, усложнение монтажа таких фильтров.



а

б

Рис.3.62. Корзина для реверсного крепления к фильтру: а- к кассетному; б- к карманному

Кроме того, чтобы избежать ржавления этих корзин и создание искусственного источника загрязнения фильтров, они должны быть изготовлены из нержавеющей стали или оцинкованного железа, что, безусловно, может привести к удорожанию стоимости таких фильтров. Однако, при соблюдении всех требований по качеству металла и увеличению стоимости фильтров, такой подход к установке карманных фильтров в КВОУ

энергетических ГТУ оправдывает себя и обеспечит надежную работу системы фильтрации воздуха и энергоблока в целом.

На рис.3.63а представлена схема реверсной установки карманного фильтра к фильтру другой ступени. Под действием сил гравитации снег устремляется вниз, не заполняя собой карманы фильтров (Рис.3.46б) [28].

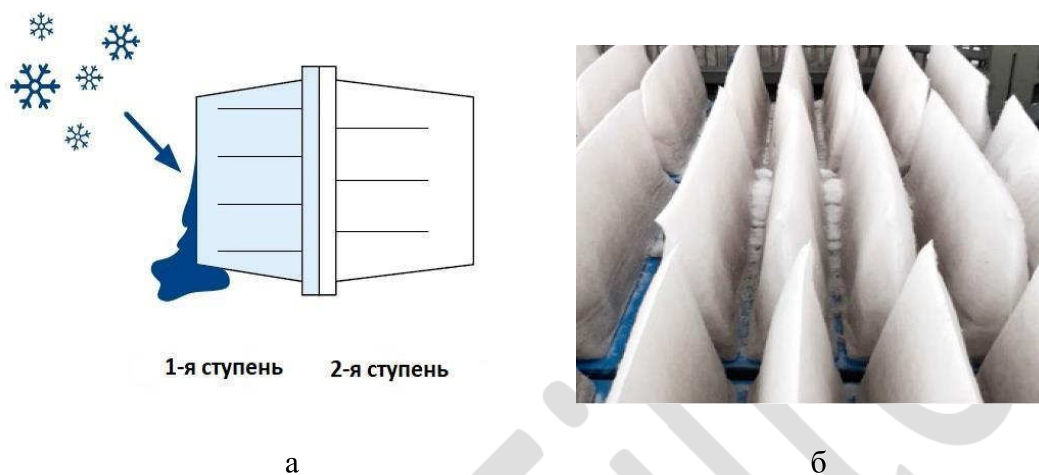


Рис.3.63. Реверсная установки карманного фильтра; а- на схеме; б- в КВОУ ГТУ

На рис.3.64 для сравнения показано состояние карманных фильтров в зимний период эксплуатации при базовой (Рис.3.64а) и реверсной (Рис.3.64б) установке карманных фильтров в КВОУ энергетических установок. Комментарии излишни.



Рис.3.64. Установка карманных фильтров: а- базовая; б- реверсная

Несмотря на погодные козырьки КВОУ, атмосферные осадки в виде снега и дождя оказывают существенное влияние на работу системы фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ. С целью определения эффективности влагоудаления карманных

фильтров, установленных реверсно в КВОУ, на испытательном стенде компании Микропор в ноябре 2022 года было выполнено тестирование фильтр-элемента, изображенного на рис.3.49. Испытание фильтра выполнялось в полном соответствии с новым стандартом ISO 29461-2. Водный туман создавался форсунками, подающими воду на расстоянии 1.5 м от карманного фильтра, влажность воздуха поддерживалась на уровне 97%, подача воды осуществлялась в течение 3 часов (Рис.3.65).

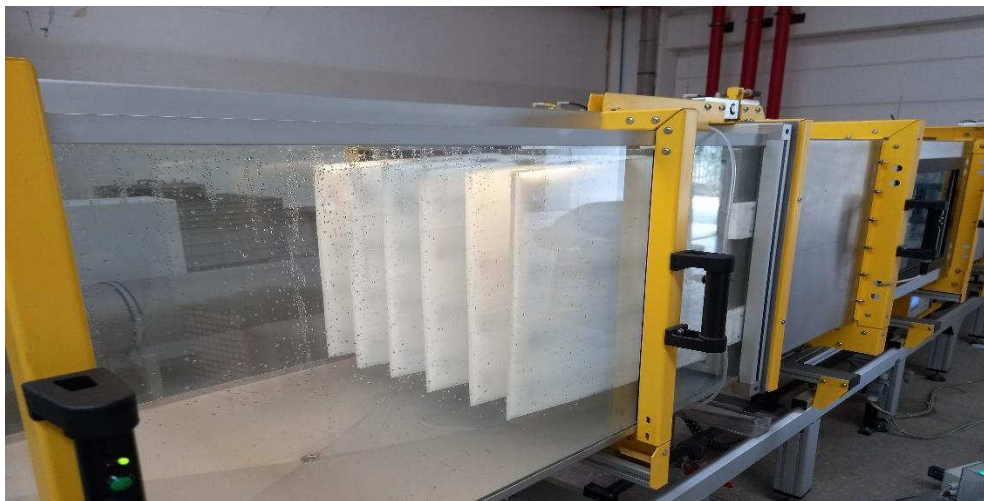


Рис.3.65. Тестирование карманного фильтра на стенде компании Микропор

В процессе тестирования карманного фильтра осуществлялась фото и видео фиксация результатов испытаний. Протечек воды в процессе тестирования зафиксировано не было. По истечению 3 часов теста, карманный фильтр был извлечен с испытательного стенда, после чего был выполнен визуальный осмотр. Протечек воды через спаянные карманы и уплотнения фильтровального материала с рамкой фильтра на «чистую сторону» фильтр элемента зафиксировано не было.

Таким образом, реверсная установка карманных фильтров со спаянными и самоподдерживающимися карманами, запаянным в рамку фильтра фильтровальным материалом показали свою высокую эффективность, как во время зимней эксплуатации на КВОУ энергетической ГТУ по предотвращению попадания снега, так и на испытательном стенде при имитации атмосферных дождей по методике стандарта ISO 29461-2.

Реверсную установку карманных фильтров целесообразно устанавливать в КВОУ энергетических ГТУ, имеющих антиайсинговую систему, представляющую собой подачу горячего воздуха через форсунки распыла из-за одной из ступеней компрессора. В этом случае заноса снегом карманов фильтров, как это показано на рис.3.56а и 3.64а, опасаться не следует. При одном условии, что фильтры изготовлены качественно.

3.2.5. Картриджные, конусные и «чулочные» фильтры

Кратко остановимся на специальном секторе статических фильтров, представляющих собой картриджи, конусные и «чулочные» фильтры. Кратко, потому, что такой тип фильтров не нашел широкого применения в «большой» энергетике и применяется в основном на компрессорных станциях. Хотя есть и исключения. В 2007 году американская компания Donaldson поставила на КБОУ ГТЭ-160 Калининградской ТЭЦ-2 двух ступенчатую систему фильтрации GDS (Рис.3.66) [29].



Рис.3.66. Система фильтрации компании Donaldson (США)

Конструктивная особенность фильтр элементов этой системы заключается в том, что поверх пары конических фильтров второй ступени очистки натягиваются съемные фильтр – “чулки” первой, предварительной очистки (ФГО). Они предназначены для очистки атмосферного воздуха от крупных частиц пыли, зерен и других загрязнений. По данным производителя их улавливающая способность согласно стандартам ASHRAE - 90% и соответствует классу очистки EU4. Вторая ступень (тонкой) очистки ФТО – конические фильтры выпускаются с наполнителем по технологии Spider-Web, основанной на использовании нановолоконной сетки из субмикронных волокон (EU9). В месте соединения пары фильтр элементов предусмотрена герметичная уплотняющая прокладка, которая должна предохранять от протечек влаги и коррозии.

По заявлению производителя конусная форма фильтр элементов лучше, чем прямоугольная, поскольку позволяет увеличить поверхность фильтрующего материала, а, следовательно, пылеемкость фильтра, сохраняя при этом компактные размеры. Утверждение, что круглая форма фильтров с материалом Spider -Web лучше с аэродинамической точки зрения, чем прямоугольная форма фильтров с микроскладками является спорной. Это объясняется тем, что открытая часть складки на выходящей

стороне круглого фильтра значительно меньше, чем на входящей. Следствием этого являются относительно высокие потери давления на выходе складки, что существенно поднимают кривую дифференциала давления, которое, в свою очередь, чувствительно к внутренним факторам – влажности и пыли.

В прямоугольных фильтрах с микроскладками открытые части входа и выхода складки одинаковы. Это означает, что прохождение потока внутри фильтра более уравновешенно, кривая параметров дифференциала давления более ровная и чувствительность к внутренним факторам меньше. В работе [30] показано, что фильтры класса F8 и F9 со стекловолоконной средой Wet Laid имеют более низкие дифференциалы давления и более ровные кривые дифференциалов давления, чем у фильтра со средой Spider -Web. При этом фильтр класса F8 с микроскладками из стекловолоконной среды Wet Laid удерживает в 1,43 раза больше пыли, чем фильтр со средой Spider -Web, а аналогичный фильтр класса F9 – в 3,3 раза больше.

Высокая влажность воздуха в этом регионе существенно влияет на работу воздушных фильтров. Вследствие расположения фильтр элементов этой системы параллельно потоку воздуха, фильтр предварительной очистки улавливает влагу в том же направлении, оставаясь влажным в течение долгого периода времени. Существует вероятность, что накопленная влага будет проникать и аккумулироваться в конусных фильтрах, вызывая рост давления на фильтр элементах. При достижении критических значений внутреннего давления, накопленная в фильтре влага может поступать на вход ГТУ. Выполненное нами в октябре 2007 года обследование КВОУ ГТУ подтвердило это предположение. На Рис.3.67 отчетливо видна лужа воды на “чистой стороне” КВОУ за фильтрами.



Рис.3.67. Влага на чистой стороне КВОУ за фильтрами

Осевые размеры фильтров (порядка 1,44 метра) поставили под сомнение утверждение производителей о легкой замене фильтров – “чулков” большого конуса при работающей ГТУ (Рис.3.68). Если учесть, что эту процедуру необходимо осуществлять на высоте более 2,2 метра без специальных приспособлений, для фильтров верхнего ряда, то эта задача выглядит трудновыполнимой.

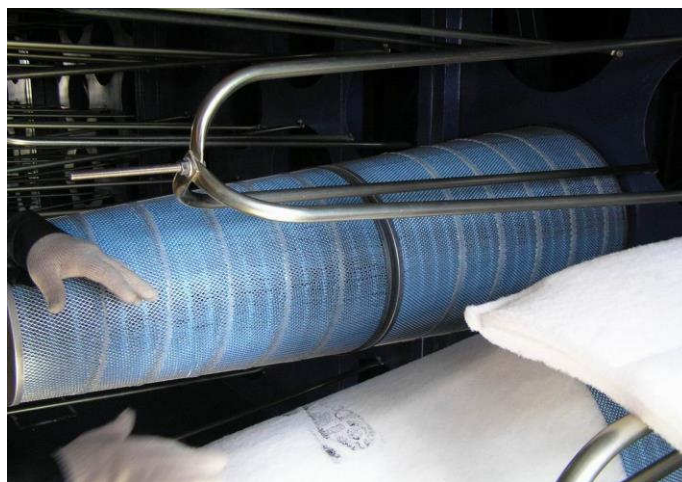


Рис.3.68. Установка фильтра «чулка» на конусные фильтры

В соответствии с инструкцией по эксплуатации производителя замена ФГО должна осуществляться, когда пыль проникает до задней части фильтра “чулка”, достигнув его изнанки, которая в этом случае темнеет. Рекомендуется раз в месяц производить визуальную проверку состояния ФГО. Другими словами, измерительных приборов, контролирующих перепад давления на ФГО не предусмотрено. Датчики давления фиксируют только перепад давления за ФГО, то есть суммарный перепад давления на фильтрах. Естественно, такое конструктивное решение в значительной степени усложняет процесс контроля за ФГО и увеличивает время и трудоемкость технического обслуживания системы фильтрации воздуха ГТУ.

Фильтры картриджного типа отличаются от карманного типа фильтров своей компактностью. Принцип функционирования статических фильтр-элементов картриджного типа аналогичен работе импульсных фильтров, но без очистки обратным импульсом. В зависимости от области применения они изготавливаются из таких материалов как: углеволокно, целлюлоза, полипропилен, синтетические и полиэфирные волокна.

По внешнему виду фильтр-элементы картриджного типа бывают следующих видов: конические, цилиндрические, с дном открытого и закрытого типа и другие. Каркасная

сетка из пластика или металла придает жесткость фильтр-элементам, а сам материал плотно складывают, подобно "гармошке"(Рис.3.69).



Рис.3.69. Картриджный фильтр компании FFT (clck.ru/33hwU2)

Промышленные картриджные фильтры очистки воздуха делятся на три типа:

- Фильтр грубой очистки воздуха;
- Фильтр тонкой очистки;
- Фильтр высокоэффективной очистки.

Картриджные фильтры успешно эксплуатируются, как в районах с умеренным климатом, так в регионах с низкими температурами (Рис.3.70).



а



б

Рис.3.70. Картриджные фильтры компании FFT в эксплуатации: а- в умеренном климате Заволжска (Нижний Новгород); б- на Салымском месторождении в Западной Сибири.

Американская компания Gore (G) для своих цилиндрических фильтров применяет запатентованную многослойную конструкцию, обеспечивающую фильтрацию воздуха класса E12 (T12) (Рис.3.71).

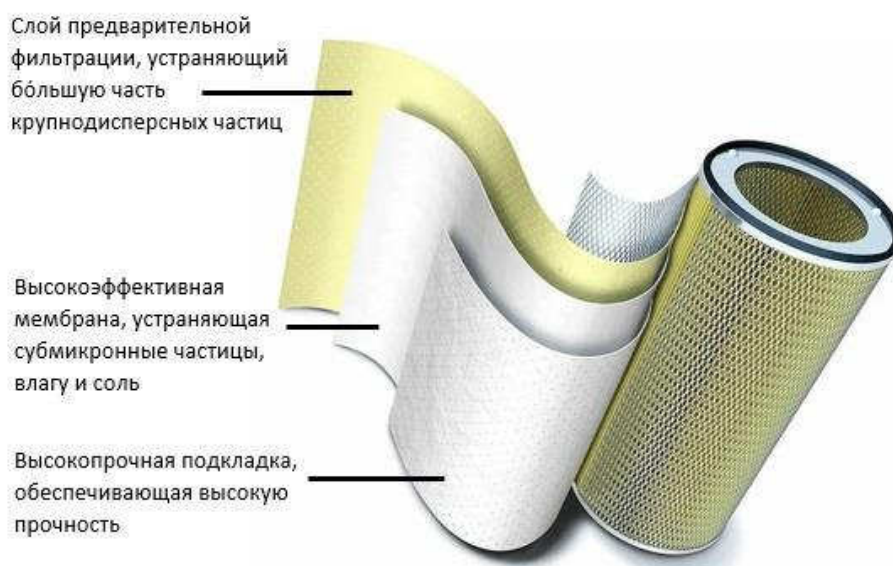


Рис.3.71. Многослойная конструкция фильтра компании Gore [31]

Такая конструкция фильтров обеспечивает предотвращение проникновения мелкодисперсных частиц, грязной воды, растворов солей, возникновения коррозии в КВОУ и ГТУ, и, как следствие, потерь выходной мощности турбомашин (Рис.3.72) [32].



Рис.3.72. Цилиндрические фильтры компании Gore в КВОУ ГТУ (clck.ru/33j5fuG)

3.2.6. Кассетные фильтры

Кассетные фильтр элементы в современных системах фильтрации циклового воздуха энергетических установок используются в качестве фильтров предварительной или финишной (конечной) очистки. К ним, как остальным фильтрам общего назначения, предъявляются требования: «выдерживать механические напряжения, которые могут возникать при нормальном использовании». Однако, ни в одном из проанализированных в первой главе стандартах, нет критерия (требования) по величине давления на разрыв воздушных фильтров общего назначения. В отечественном ГОСТ Р 58499-2019 (ИСО 29461-1:2013) «Системы очистки воздуха, подаваемого в роторные установки», а также новом стандарте ISO 29461 этого критерия также нет. В западном стандарте это требование планируется к рассмотрению. Однако, для газотурбинных технологий этот критерий является одним из основополагающих и нужен сейчас, а не через несколько лет. Поэтому западные производители ВЗТ для энергетических ГТУ сами начали устанавливать требования для воздушных фильтров, устанавливаемых в их КВОУ.

Так немецкая компания FAIST AIS выпустила несколько Technical Information Letter (TIL) -Технических Информативных Писем, в которых дала новые рекомендации по выбору фильтров для КВОУ собственного производства. Надеемся, что этот материал будет интересен для энергетических компаний, использующих КВОУ ГТУ компании FAIST AIS. Кроме того, изложенная в этих TIL информация может служить неким ориентиром для отечественных производителей воздушных фильтров для повышения качества своей продукции, поскольку, как было отмечено, в отечественных ГОСТ критерия по давлению на разрыв фильтра еще нет.

В TIL[33] особо отмечалось, что важным требованием к кассетным фильтрам тонкой очистки (ФТО) является наличие защитной сетки со стороны выхода воздуха. В случае разрушения фильтровального материала защитная сетка не позволит ему покинуть пределы фильтра и попасть в проточную часть ГТУ. Поэтому вторым важнейшим требованием к ФТО является давление на разрыв, минимальная величина которого рекомендуется производителями ГТУ. На рис.3.73 и 3.74, приведенном в этом Техническом Информативном Письме, показано к чему может привести недостаточное значение давление на разрыв фильтра и ненадежная защитная сетка со стороны выхода воздуха. На Рис. 3.73 зафиксировано массовое разрушение фильтровального материала ФТО и скопление его перед глушителем шума КВОУ. Можно предположить, что часть это фильтровального материала вместе воздушным потоком попала в воздуховод и проточную часть ГТУ. На Рис.3.74 хорошо видно, что причиной разрушения и выпадения

фильтровального материала из рамки фильтра является отрыв защитной сетки на стороне выходы воздуха. На приведенных рисунках легко узнаваемы фильтры компании E.



Рис. 3.73. Массовое разрушение фильтров: а- в КВОУ; б- у глушителей шума

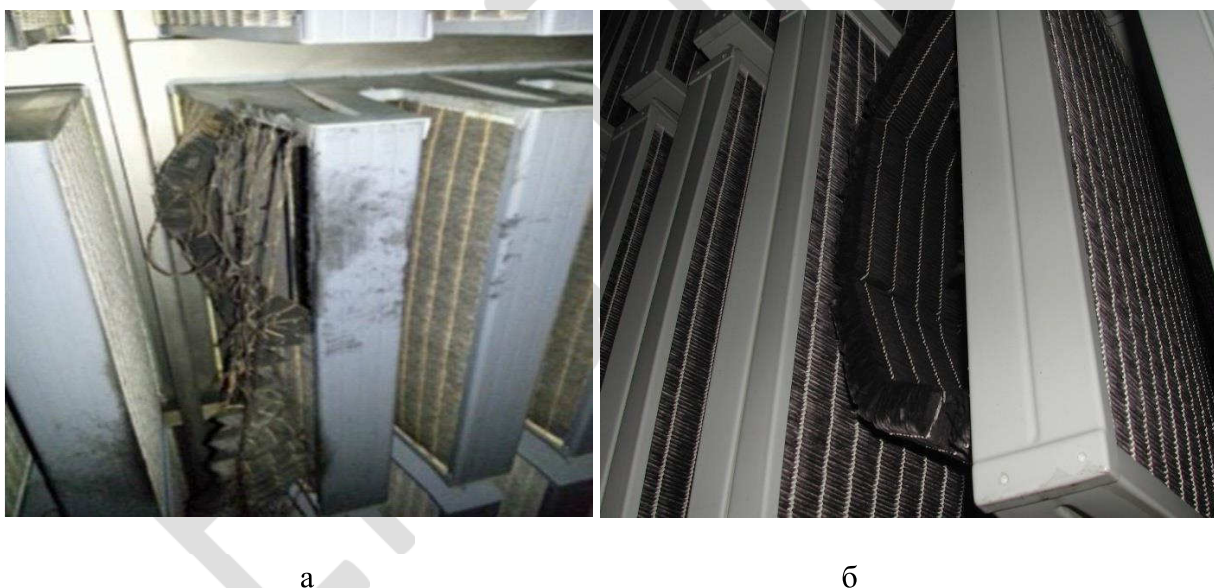


Рис.3.74. Последствия отрыва защитной сетки на стороне выходы воздуха: а- разрушения фильтровального материала; б- выпадение фильтровального материала из рамки фильтра

Исходя из этого, компания FAIST AIS рекомендует, что компактные кассетные фильтр элементы должны иметь **жесткие и хорошо закрепленные пластмассовые решетки, установленные на ВСЕХ V-образных сторонах фильтровального материала вверх по потоку** (со стороны выхода воздуха - “чистой стороне воздуха”).

На рис.3.75а представлен вид ФТО с пластмассовой защитной сеткой, покрывающей фильтровальный материал с “чистой стороны воздуха” при базовой установке фильтра в

КВОУ. При реверсной установке ФТО, защитная сетка устанавливается внутри V-образных карманов (Рис.3.75б). Встроенный дренажный канал в ФТО предотвращает проникновение влаги на “чистую сторону воздуха”. Для ликвидации протечек грязного воздуха и влаги, прокладки на рамках ФТО бесшовные, полиуретановые.

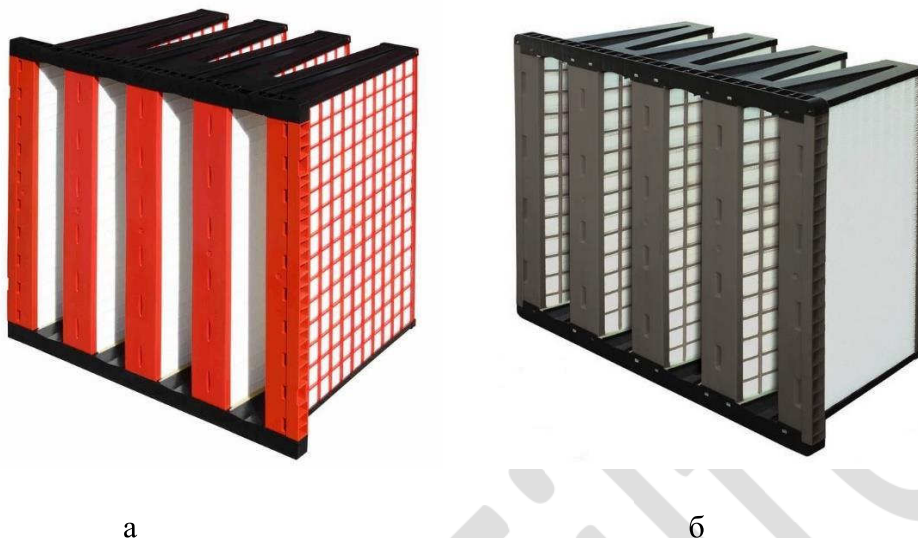


Рис.3.75. Кассетные фильтры с защитной сеткой: а- при базовой установке; б- при реверсной установке

На рис.3.76. приведены кассетные фильтры компании Микропор при базовой установке в КВОУ энергетической ГТУ и при реверсной установке. Отчетливо видно, что они полностью соответствуют рекомендациям производителя ВЗТ для энергетических ГТУ.



Рис.3.76. Кассетные фильтры компании Микропор с защитной сеткой: а- при базовой установке; б-при реверсной установке.

Компания FAIST AIS рекомендует [34] вертикальные складки из

микростекловолоконного фильтровального материала, которые обеспечивают лучший дренаж атмосферной влаги. С соответствии с рекомендацией компании FAIST AIS фильтры тонкой очистки должны подвергаться тестированию на водостойкость. Для прохождения этого теста необходимо залить в V-образную секцию компактного фильтра воду до уровня 250 мм (для фильтра глубиной 292 мм) и 350 мм (для фильтров глубиной 400/440 мм), с целью убедиться в отсутствии протечек в течение, по крайней мере, 30-60 минут. Вес залитой воды оказывает значительное гидростатическое давление на донную часть V –образной секции фильтра. *Таким образом, задачей теста является не только подтверждение водостойкости, но и общей целостности конструкции фильтра.* Поскольку существует взаимосвязь между тестом на водостойкость и тестом на разрыв фильтра, настоящий тест на водостойкость дает представление о целостности, как фильтрующего материала, так и рамки фильтра. Согласно рекомендации компании FAIST AIS рамка фильтра изготавливается из высокопрочной пластмассы.

Целостность фильтровального материала имеет важнейшее значение. Фильтр, прошедший тест на герметичность, с малой вероятностью пропустит частицы пыли или влаги на сторону чистого воздуха. С повышением класса эффективности, когда цель фильтра – снизить или исключить загрязнение компрессора ГТУ, эти свойства фильтра становятся чрезвычайно важными. Таким образом, тест на водостойкость демонстрирует стабильность эффективности фильтрации воздуха на протяжении всего срока эксплуатации фильтра тонкой очистки. Эти фильтры должны выдерживать давление на разрыв в сухом и влажном состоянии более 6000 Па. Очень важным условием прохождением этого теста, является требование выдерживать фильтром назначенное давление во влажном состоянии. Фильтровальный материал, изготовленный из целлюлозы или бумаги после намокания, не сможет выдержать такого давления.

Таким образом в этих ТИЛ были материализованы лаконичные требования существующих ГОСТ и стандартов: «выдерживать механические напряжения, которые могут возникать при нормальном использовании».

Рассмотрим эти рекомендации и оценим их целесообразность и достаточность для обеспечения надежной и эффективной фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ. В основном эти рекомендации касаются технических и технологических приемов изготовления фильтр элементов КВОУ, обеспечивающих надежную эксплуатацию ГТУ. Как отмечалось ранее, кассетные фильтры используются в КВОУ ГТУ в качестве промежуточной или финишной (конечной) ступени. Следовательно, они являются «последним рубежом обороны» энергетической ГТУ от загрязнений окружающей среды.

Для предотвращения загрязнения проточной части ГТУ, помимо заданной эффективности фильтров, необходимо обеспечить герметичность самих кассетных фильтров и их установки в КВОУ. С этой целью используются уплотнительные прокладки, закрепленные на фильтрах (Рис.3.77). По мнению авторов ТП эти прокладки должны быть бесшовными, полиуретановыми (Рис.3.77а). Отсутствие швов гарантирует, что в процессе эксплуатации швы не разойдутся. С этим можно и нужно согласиться.

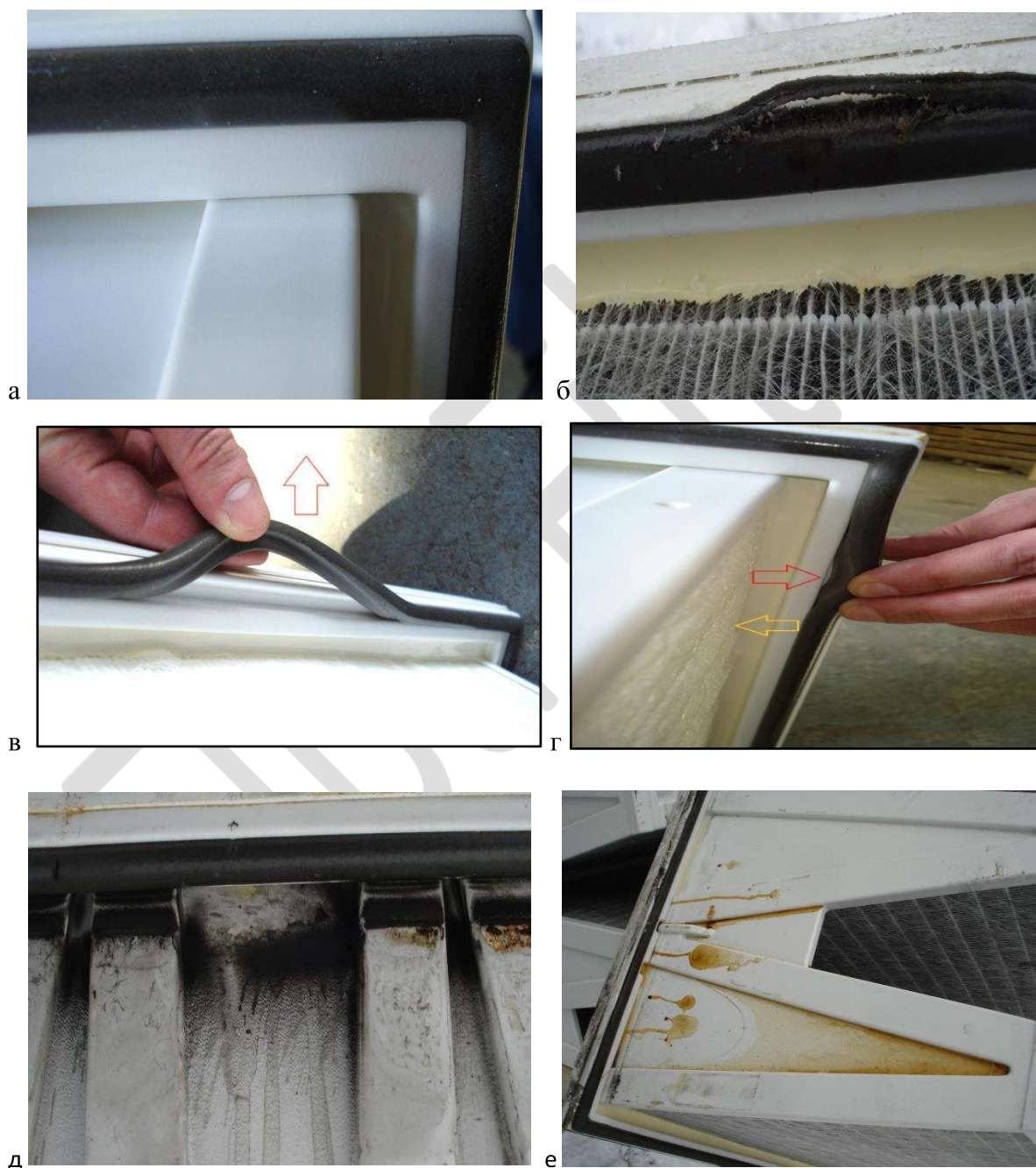


Рис.3.77. Бесшовные прокладки кассетных фильтров компании E: а- на новом фильтре; б- расслоение прокладки в эксплуатации; в- прокладка не зафиксирована; г-неплотное прилегание; д-протечки грязного воздуха через уплотнение; е- протечки масла через уплотнение

Полиуретан известный материал, который стал широко использоваться в фильтрационных технологиях в качестве замены клееных резиновых прокладок, которые в процессе эксплуатации отлеплялись от рамки фильтра. Однако, как видно на Рис.3.77б, применение полиуретана в качестве прокладки не гарантирует его прочности и упругости. Одного названия мало -важно знать марку и характеристики этого материала. Мы уже рекомендовали осуществлять определение твердости пластмассовых корпусов воздушных фильтров тонкой очистки с помощью твердомера (дюрометра) по Шору тип «D». А при помощи дюрометра типа «А» определять твердость мягких пластмасс и резиновых изделий (например, прокладок фильтров). Эта проверка позволит определить соответствие технических характеристик установленных на фильтрах прокладок.

Помимо выбора материала прокладки важно, как она крепится в пластмассовой рамке кассетного фильтра. На рис.3.77в и 3.77г показана некачественная фиксация полиуретановых прокладок к рамкам кассетных фильтров. В результате такого незафиксированного крепления прокладок загрязненный воздух через возникшие неплотности поступает на чистую сторону (за фильтрами) (Рис.3.77д и 3.77е).

Визуальная оценка эффективности работы системы фильтрации циклового воздуха ГТУ характеризуется состоянием чистой стороны КВОУ (за фильтрами финишной очистки) и проточной части ГТУ. На рис.3.78 зафиксировано наличие маслянистых пятен в КВОУ за ФТО (Рис.3.78а) и сильного загрязнения лопаток осевого компрессора, несмотря на еженедельную промывку ГТУ моющим раствором (Рис.3.78б).



а



б

Рис.3.78. Визуальная оценка эффективности кассетных фильтров компании E: а-маслянистые пятна в КВОУ; б-состояние лопаток осевого компрессора ГТУ после снятия

Требования действующих стандартов и ГОСТ гласят, что конструкцией фильтра должна быть обеспечена его плотная посадка в воздуховоде, исключая утечки по контуру герметизации при соблюдении порядка монтажа.

После таких результатов эксплуатации уплотнительных прокладок на кассетных фильтрах немецкой компании Е следует правомерный вопрос: кто может дать гарантию о соответствии этих фильтров заявленной в их паспортах эффективности? Ответ очевиден - никто. Эти фильтры не соответствуют ни западным стандартам, ни отечественным ГОСТ.

Для предотвращения загрязнения лопаток компрессоров ГТУ, не менее важна и герметизация стыков фильтровального материала с рамкой фильтра. На рис.3.79а зафиксирована герметизация стыков на кассетном фильтре компании Ф. С одной стороны V-образного канала фильтра герметизация выполнена (зеленая стрелка), а с другой стороны ее нет (красная стрелка). Очевидно, что при такой технологической дисциплине изготовления воздушных фильтров, говорить о их качестве и эффективности не имеет смысла. Налицо низкий уровень контроля выпускаемой продукции в конкретном случае. На рис.3.79б, для примера, представлена герметизация кассетного фильтра компании М. Герметизация стыков фильтровального материала выполнена по всему периметру V-секции кассетного фильтра.

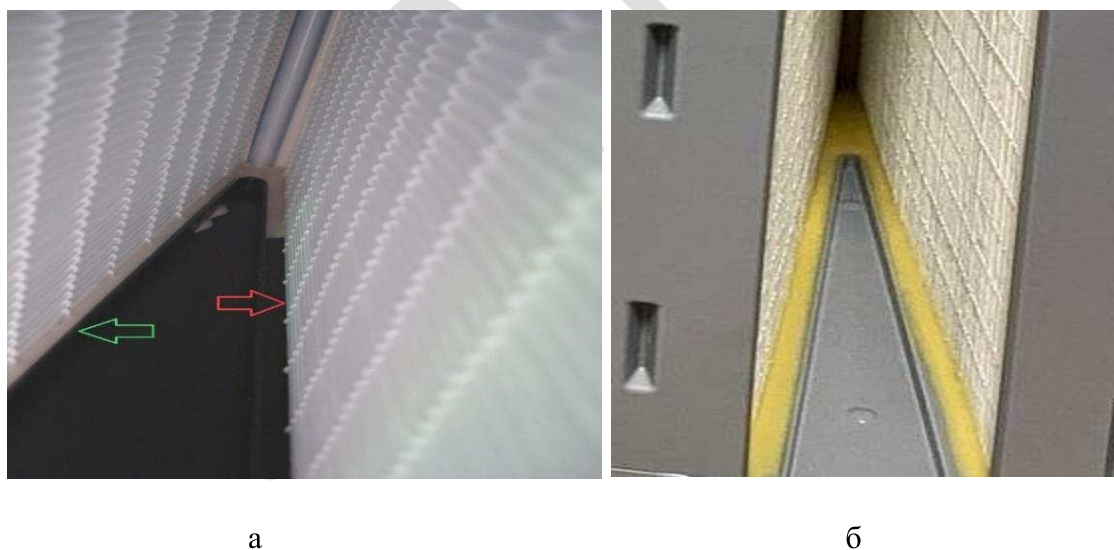


Рис.3.79. Герметизация стыков фильтровального материала и рамки внутри V-секций кассетного фильтра: а -отечественной компании Ф (зеленая стрелка - наличие герметика; красная стрелка- отсутствие герметика); б-турецкой компании М

На рис.3.80. представлена герметизация стыков фильтровального материала и рамки кассетных фильтров компаний М и Е по внешнему периметру. Как видно на Рис.3.80б на фильтре класса Е11 компании Е зафиксированы протечки грязного воздуха в месте

соединения рамки фильтра с фильтровальным материалом. Такой кассетный фильтр не может относиться к группе эффективных фильтров ЕРА, как не соответствующий западным стандартам и российским ГОСТ.



Рис.3.80. Герметизация стыков фильтровального материала с рамкой кассетного фильтра: а- компании М; б- компании Е.

На рис.3.80а отчетливо видно бесшовную уплотнительную прокладку из полиуретана, герметичную заливку стыков рамки фильтра с фильтровальным материалом и прочную пластмассовую защитную решетку. На фильтре класса Е11 компании Е установлена синтетическая защитная сетка со стороны чистого воздуха при базовой установке в КВОУ ГТУ (Рис.3.80б). На ФТО класса F8 того же производителя для реверсной установки в КВОУ энергетической ГТУ, защитная сетка отсутствовала с обеих сторон (Рис.3.81а) и неудивительно, что в процессе эксплуатации фильтровальный материал без защиты был поврежден (Рис.3.81б). Объяснения производителя, о том, что повреждение фильтровального материала промежуточного кассетного фильтра не несет глобальных последствий для ГТУ не является корректным. Поврежденный фильтровальный материал фильтра промежуточной очистки под воздействие воздушного потока попадает в финишный фильтр, дросселирует его, тем самым вызывает рост перепада давления на нем и снижение вырабатываемой мощности ГТУ.

Выясним, какая же защита фильтровального материала кассетных фильтров более надежна для очистки циклового воздуха энергетических ГТУ: с синтетической сеткой и пластмассовой решеткой?

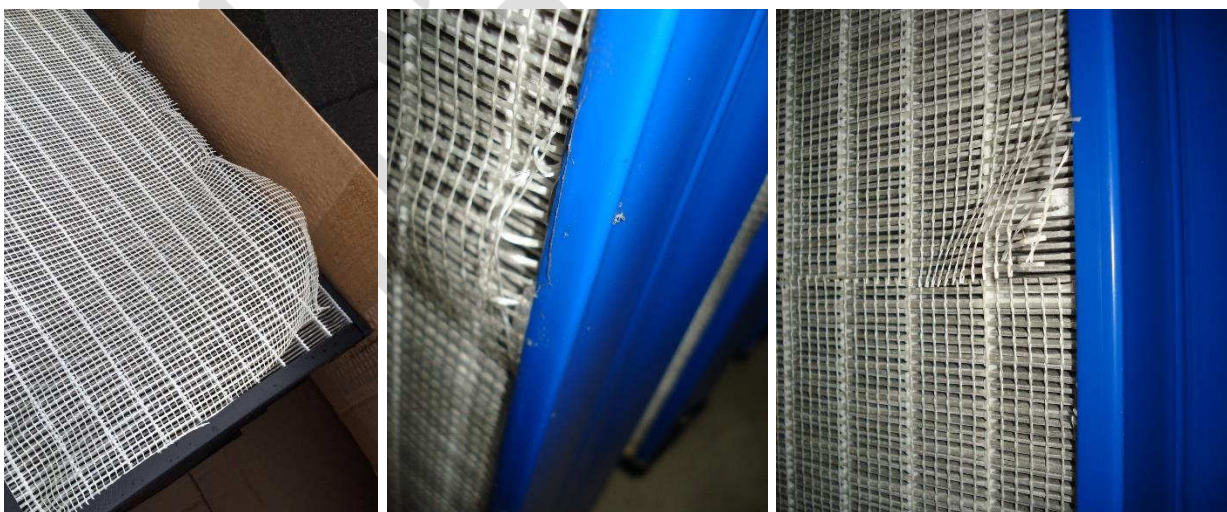


а

б

Рис.3.81. Реверсная установка ФТО F8 защитная сетка отсутствует: а- перед установкой в КВОУ; б- в процессе эксплуатации повреждение фильтровального материала

На Рис.3.82 показаны характерные неисправности синтетических защитных сеток кассетных фильтров ряда отечественных производителей [35]. Отчетливо видно, что защитные сетки ФТО изготовлены из разного синтетического материала, имеют отличающуюся толщину нитей и размеры ячеек. При всех этих отличиях, они имеют одну и ту же проблему, обусловленную недостаточной фиксацией защитной сетки с корпусом фильтра.



а

б

в

Рис.3.82. Повреждение синтетические защитной сетки: а- отрыв; б- отслоение; в- разрыв

На Рис.3.82 б,в представлены кассетные фильтры тонкой очистки отечественной компании Ф, обнаруженные в КВОУ, с поврежденной защитной сеткой, концы которой вышли из корпуса ФТО (в), также как и на (б). В случае повреждения или недостаточной

фиксации защитной сетки в ФТО, такая неисправность квалифицируется как нарушение целостности конструкции и фильтр элемент должен быть немедленно удален из КВОУ ГТУ и заменен новым. В случае несвоевременного обнаружения нарушения целостности защитной сетки фильтра, может произойти дальнейшее разрушение фильтровального материала и попадание его в проточную часть осевого компрессора ГТУ.

Для выяснения причин недостаточной фиксации защитных сеток из синтетического материала было выполнено препарирование кассетных фильтров разных производителей. На Рис.3.83 показан вскрытый стык фильтровального материала и рамки фильтра тонкой очистки немецкой компании E.

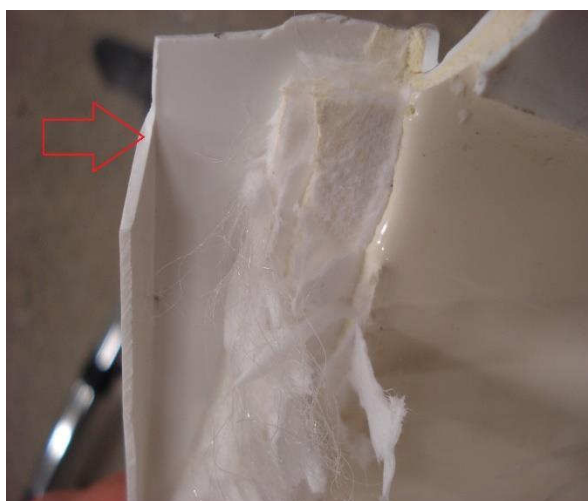


Рис.3.83. Отсутствие герметика на рамке кассетного фильтра компании E

Как видно, технология крепления синтетической защитной сетки этого ФТО сводится к ее подгибанию в рамку фильтра и фиксацию с помощью герметика. Однако, очевидно - герметик на внутренней стороне рамки фильтра отсутствует, что создает предпосылку отслоения защитной сетки. Кроме этого, отсутствие герметичности стыка рамки ФТО и фильтровального материала приводит к неплотностям, через которые грязный воздух поступает на лопатки ГТУ.

Таким образом, мы установили, что защита кассетных фильтров тонкой очистки с помощью защитной сетки имеет ряд недостатков, обусловленных несоответствующей прочностью нитей и ненадежной системой фиксации их в корпусе фильтра. Однако, как показал опыт эксплуатации, и фильтры тонкой очистки, снабженные синтетическими решетками, не всегда обеспечивают надежную защиту фильтровального материала. На Рис.3.84 изображен ФТО немецкой компании FFT, синтетические решетки которого вышли из рамки фильтр элемента.



Рис.3.84. Ненадежно закрепленная защитная синтетическая решетка

Эти факты говорят о том, что синтетическая решетка данного производителя фильтров не имеет надежной системы крепления и герметизации. Кроме того, она не обладает достаточной жесткостью для фиксации фильтровального материала, как у решетки, изготовленной из пластмассы. В данном случае, защитная решетка сама является источником угрозы попадания в проточную часть ГТУ.

Как мы убедились на приведенных примерах, синтетические защитные сетки и решетки не всегда обеспечивают должную защиту фильтровального материала ФТО. Одной из причин этого является ненадежное крепление защитных сеток (решеток) в корпусе кассетных фильтров тонкой очистки.

Производители воздушных фильтров, которые дорожат своим имиджем, уделяют большое внимание защите фильтровального материала от разрыва. Они разрабатывают и патентуют оригинальные системы фиксации защиты фильтров тонкой очистки.

Резюме:

Авторы рекомендуют, осуществлять проверку целостности уплотнений и защиты фильтровального материала ФТО и не только во время входного контроля, но и при каждом останове ГТУ, со стороны чистого воздуха КВОУ. В процессе эксплуатации фильтров, ненадежно закрепленные защитные сетки (решетки), под воздействием вибрации оборудования и силы воздушного потока выпадают из мест их установки. Такие фильтры должны быть немедленно удалены из КВОУ и заменены новыми.

Кассетные фильтры тонкой очистки без защитных сеток (решеток) не могут и не должны устанавливаться в КВОУ ГТУ.

Существенное влияние на надежность, водостойкость и эффективность работы кассетных фильтров оказывает способ укладки фильтровального материала в фильтр элементе. На рис.3.85 представлено направление воздушного потока воздуха в фильтрах с горизонтальной (а) и вертикальной (б) укладкой плиссированного фильтровального материала. Аэрозоли, находящиеся во взвешенном состоянии в поступающем в фильтр воздухе, сталкиваясь с поверхностью вертикальной укладки фильтровального материала, коагулируются и, под действием силы гравитации, стекают в нижнюю часть фильтра [36]. В фильтрах тонкой очистки с горизонтальной укладкой фильтровального материала аэрозоли по линии воздушного потока, совпадающей с линией плиссировки волокна, могут проникать через фильтр.

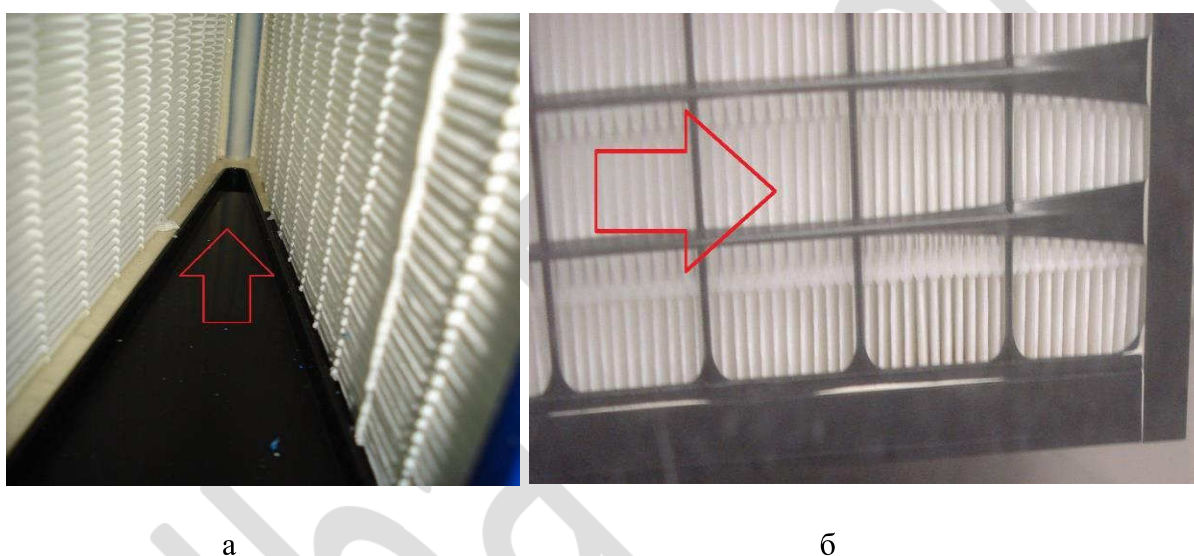


Рис.3.85. Укладка фильтровального материала: а- горизонтальная; б-вертикальная

На рынке воздушных фильтров образовалось два лагеря производителей этой продукции: одна, наиболее массовая – это ярые сторонники горизонтальной укладки фильтровального материала, другая, менее многочисленная – представители вертикальной укладки. Нельзя не отметить и другую, небольшую, но, очень гибкую группу компаний, производящих воздушных фильтров с обеими способами укладки фильтровального материала.

Сторонники обоих больших групп производителей воздушных фильтров приводят резонные аргументы в качестве обоснования своего выбора. Так, при горизонтальной укладке плиссированного фильтровального материала, частички пыли вместе с воздушным потоком поступают в фильтр по траектории параллельной складкам, а при вертикальной укладке – под углом 90^0 (см. Рис.3.85б). В результате чего начальный перепад давления на фильтрах с горизонтальной укладкой фильтровального материала, при прочих равных

условиях, ниже, чем на фильтрах с вертикальной укладкой. Другим аргументом этих представителей поставщиков фильтров является то, что удаление влаги на входе в КВОУ должно быть выполнено фильтрами коагуляторами, а задача ФТО сводится к очистке циклового воздуха ГТУ только от мелкодисперсных частиц. Но, с введением нового стандарта ISO 29461-2 (тестирование на водостойкость фильтров для роторных машин) позиция сторонников горизонтальной укладки фильтровального материала существенно пошатнулась.

Производители воздушных фильтров с вертикальной укладкой фильтровального материала утверждают, что практически не существует коагуляторов, которые 100% удаляют атмосферную влагу из воздушного потока. Наши исследования по определению водостойкости фильтров коагуляторов и фильтров грубой (средней) очистки показали, что только несколько фильтр - элементов способны противостоять атмосферной влаге [22]. Кроме того, существуют такие климатические условия эксплуатации ГТУ, при которых влажность воздуха держится у отметки 100% в течение целого года или нескольких месяцев (страны с тропическим климатом, морские платформы и прибрежные ТЭЦ).

Таким образом, на одной чаше весов противостояния установился повышенный начальный перепад давления на фильтрах и, как следствие, недовыработка электроэнергии ГТУ, на другой - снижение эффективности фильтров из-за их намокания и, как результат, потеря мощности турбомашин из-за более интенсивного загрязнения ее проточной части.

Для выяснения кто же из этих двух сторон прав, нами до появления ISO 29461-2 были проведены сравнительные стендовые испытания воздушных фильтров тонкой очистки двух зарубежных производителей, относящихся к противоположным лагерям укладки фильтровального материала немецкой компании E (образец №1) и шведской C (образец №2). Технические характеристики этих фильтров приведены в Таблице 3.11.

Таблица 3.11 Технические характеристики фильтров тонкой очистки

Параметры образца фильтра	№ 1	№ 2
Класс очистки	F9	F9
Размеры (мм)	590x590x400	592x592x292
Площадь фильтрации (м ²)	23	19
Фильтровальный материал	гидрофобное стекловолокно	гидрофобное стекловолокно

Укладка фильтровального материала	горизонтальная	вертикальная
Количество V-образных карманов (шт.)	3	4
Начальный перепад давления Паспорт/ Замер (Па)	78/ 85	126/125
Защитная решетка (сетка) на фильтре	синтетическая	пластмассовая
Вес фильтра (кг)	7, 64	8,17

Как видно из представленных данных оба фильтра имеют одинаковый класс очистки (эффективность) и идентичный фильтровальный материал. Отличаются они радиальными размерами (следовательно, площадью фильтрации), типом укладки фильтровального материала, количеством V-образных карманов, начальным перепадом давления и материалом защитной сетки на “чистой стороне воздуха”.

Задача стендовых испытаний фильтров сводилась к:

1. Сравнительной оценке эффективности очистки от механических примесей согласно ГОСТ Р EN 779-2014 (EN 779:2012);
2. Определению водостойкости водяным туманом (распыл воды форсунками);
3. Даче заключения о соответствии технических характеристик фильтров требованиям и рекомендациям производителей ГТУ и КВОУ.

Перед началом стендовых испытаний был выполнен внешний осмотр фильтров, проверка габаритных размеров фильтров мерительным инструментом и взвешивание их на электронных весах. Результаты замеров и взвешивания ФТО занесены в табл.3.11. Несмотря на меньшие габаритные размеры, фильтр № 2 оказался тяжелее фильтра № 1. В результате внешнего осмотра фильтров и проверке их габаритных размеров замечаний выявлено не было.

На Рис.3.86 представлены оба фильтра, установленные на испытательном стенде компании Toras GmbH (ФРГ) для определения их эффективности.



а

б

Рис.3.86. Кассетные фильтры на стенде по определению эффективности: а- образец № 1; б- образец №2

Тестирование образцов фильтров осуществлялось при расходе воздуха 3400 м³/ч. При этом расходе проверялся начальный перепад давления на фильтрах, указанный в их паспортах. Результаты определения фактического начального перепада давления ФТО приведены в табл.3.11.

Согласно ГОСТ ЕН Р 779-2014, который идентичен европейскому региональному стандарту EN 779:2012, оборудование для измерения перепадов давления должно иметь погрешность не более ± 2 Па в диапазоне от 0 до 70 Па. При перепадах давления более 70 Па погрешность должна находиться в диапазоне ± 3 % значения измеряемой величины. С учетом сказанного, фактический перепад давления на фильтре № 1 на 9 % превышает заявленный производителем этот технический параметр. Фильтр № 2 соответствует заявленной величине начального перепада давления. Таким образом, разница между фактическими начальными перепадами давления обоих фильтров составляет 40 Па.

В Табл.3.12 представлены результаты теста по определению эффективности фильтра № 1. Согласно ГОСТ ЕН Р 779-2014 (EN 779:2012) минимальная эффективность фильтра тонкой очистки класса F9 для частиц размера 0,4 мкм должна составлять 70%. С учетом погрешности измерения можно считать, что фильтр № 1 соответствует заявленному производителем классу очистки.

Табл.3.12. Результаты теста по определению эффективности образца № 1

Размер (мкм)	Количество (шт.)		Эффект (%)	Погрешность (+/-)
	До	После		
0,25	6038	2142	64,5	0,4
0,39	11447	3449	69,9	0,6
0,59	3622	791	78,2	0,6
0,79	2545	384	84,9	0,3
1,00	1607	169	89,5	1,2
1,20	777	83	89,4	1,5
1,40	706	44	93,8	2,4
1,73	1368	92	93,3	1,3
2,24	1031	44	95,7	0,9
2,74	528	7	98,7	0,7
3,46	465	8	98,3	0,8
4,47	105	5	95,5	3,2
5,92	34	0	100,0	0,0
8,37	19	0	100,0	0,0
10,00	10	0	100,0	0,0
Всего	30303	7218	76,2	

В Табл.3.13 приведены результаты теста по определению эффективности фильтра № 2. Очевидно, что фильтр № 2, в отличие от фильтра № 1, без труда подтвердил свой класс.

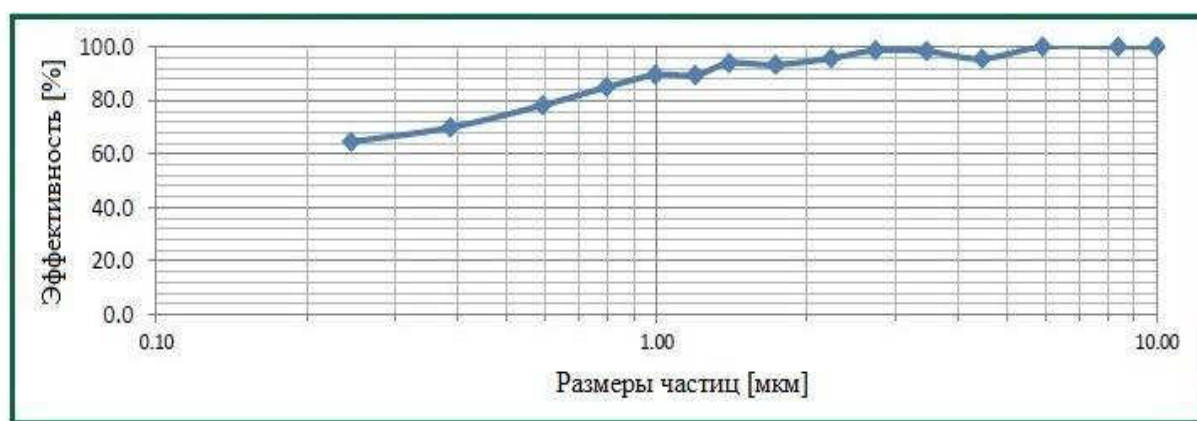
Табл.3.13. Результаты теста по определению эффективности образца № 2

Размер (мкм)	Количество (шт.)		Эффект (%)	Погрешность (+/-)
	До	После		
0,25	5744	1170	79,6	0,5
0,39	11036	1672	84,8	0,8
0,59	3534	319	91,0	0,8
0,79	2494	135	94,5	1,0
1,00	1503	52	96,5	0,5
1,20	751	19	97,5	1,3
1,40	650	13	98,0	0,3
1,73	1355	19	98,6	0,5
2,24	934	10	98,9	0,2
2,74	517	3	99,4	0,5
3,46	392	2	99,5	0,4
4,47	118	0	100,0	0,0
5,92	26	0	100,0	0,0
8,37	16	0	100,0	0,0
10,00	3	0	100,0	0,0
Всего	29073	3414	88,3	

Разность в минимальной эффективности фильтров составила 14,9%. Кроме того, следует

отметить, что фильтр № 2 полностью удаляет частицы размера 4,47 мкм в отличие от фильтра № 1. Средняя эффективность фильтра № 2 на 12,1% больше, аналогичного параметра фильтра № 1. Следовательно, на такую же величину в проточную часть ГТУ поступит меньше загрязняющих частиц.

На рис.3.87 представлены графические зависимости эффективности фильтров № 1 и № 2 от дисперсности частиц.



а

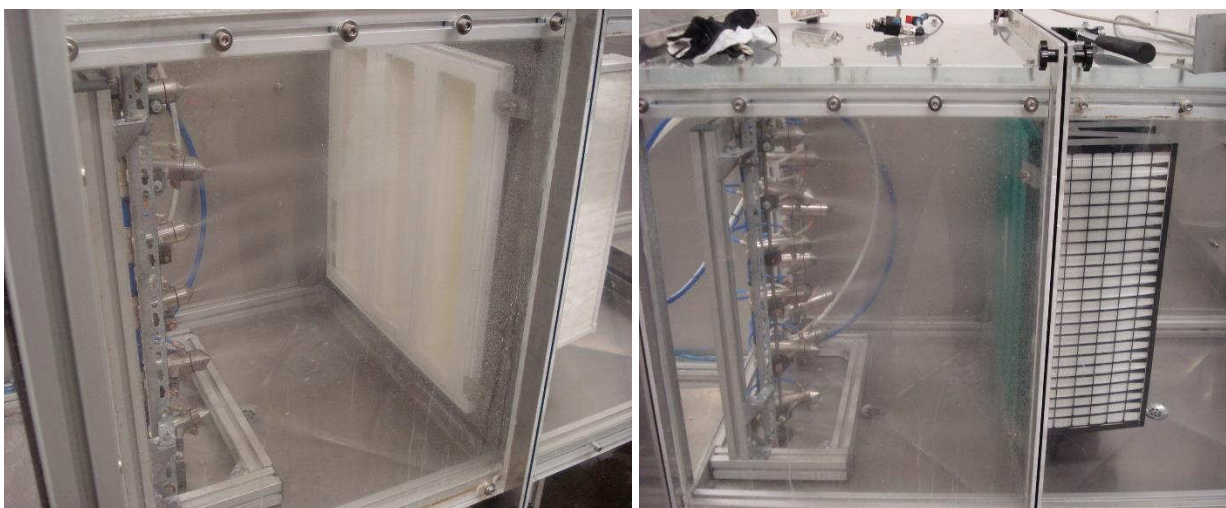


б

Рис.3.87. Тренды эффективности фильтров: а- фильтр №1 (с горизонтальной укладкой); б- образец №2 (с вертикальной укладкой)

После проведения определения эффективности обоих воздушных фильтров тонкой очистки были выполнены тесты по определению их водостойкости. Эти испытания представляли собой тестирование фильтров водяным туманом, образующегося в результате подачи распыленной воды через форсунки.

На Рис.3.88 изображены фильтры № 1 и № 2 на испытательном стенде во время распыла воды через форсунки.



а

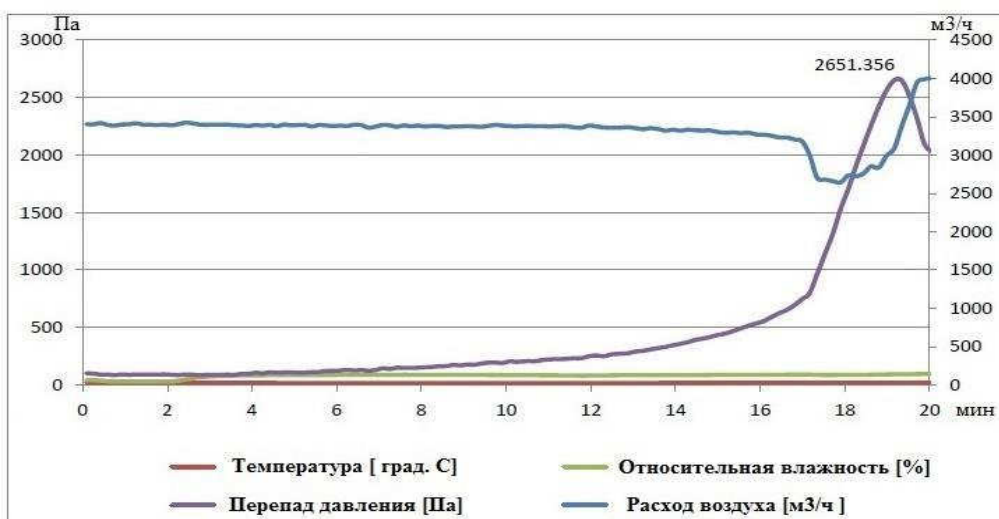
б

Рис.3.88. Кассетные фильтры на стенде по определению водостойкости: а-№1; б-№2

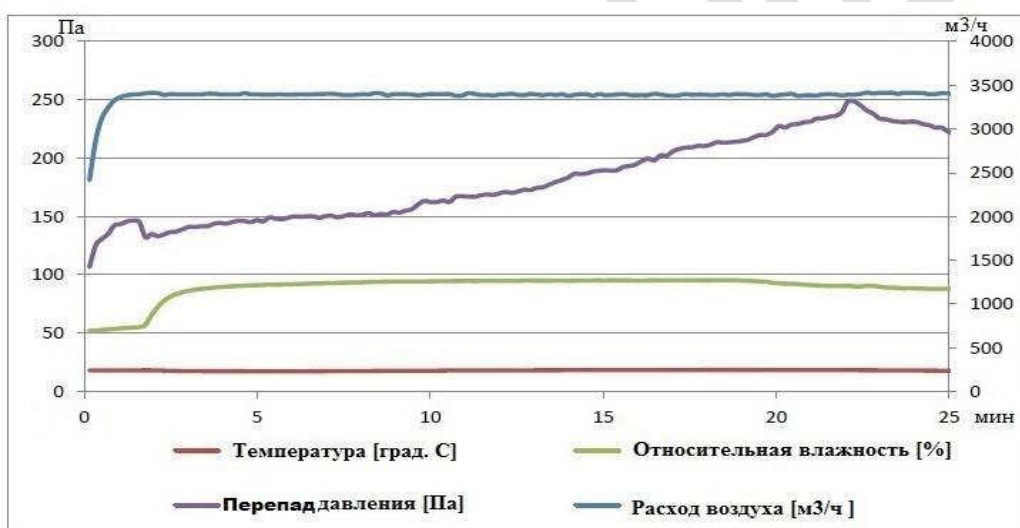
Вода к форсункам подавалась с помощью насоса. Дренаж использованной воды осуществлялся в две отдельные емкости: первая – отвод влаги на входе в образец (грязная сторона фильтра), вторая – вода, проникшая через образец (чистая сторона фильтра). Облицовка испытательного стенда органическим стеклом позволяла осуществлять визуальный контроль процесса отвода влаги и ее проникновение через фильтровальный материал образца и его стык с рамкой фильтра. Помимо этого, момент протечки воды через фильтр элемент фиксировался видео и фотоаппаратурой.

Тестирование образцов фильтров осуществлялось при расходе воздуха $3400 \text{ м}^3/\text{ч}$. В момент подачи воды к форсункам, включался отсчет времени проведения теста на водостойкость фильтра. Расход воды через форсунки составлял 1,4 литра в минуту. Первым тестированию на водостойкость был подвержен фильтр № 2. Тест продолжался в течение 25 минут, при этом максимальное значение перепада давления на фильтре составило 248 Па. Течи воды через фильтровальный материал или на его стыке с рамкой фильтра не было зафиксировано. Кроме того, деформации рамки фильтра или его фильтровального материала не отмечалось.

На Рис.3.89 приведены тренды перепада давления на фильтрах и параметров воздуха во время теста



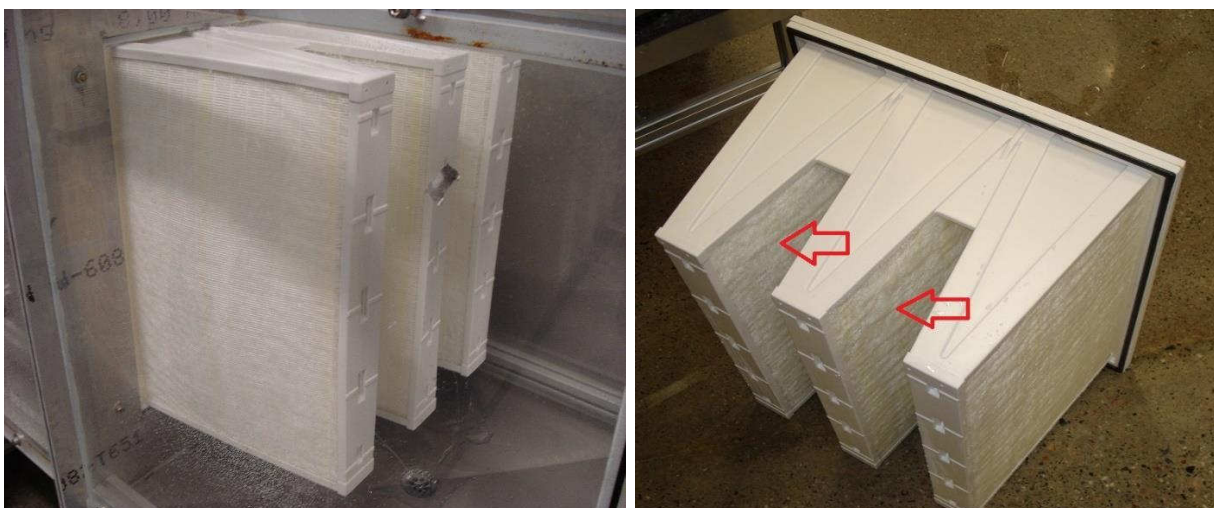
а



б

Рис.3.89. Тренды перепада давления: а-на фильтре №1; б- на фильтре №2

Тестирование фильтра № 1 продолжалось 20 минут. Первая течь воды была зафиксирована на чистой стороне фильтра через 13 минут 19 секунд при перепаде давления 409 Па. По мере дальнейшего увеличения перепада давления на фильтре отмечалась прогрессирующая деформация фильтр – элемента. Пластмассовое основание V- образных секций фильтра выгнулось в сторону подачи воды, фильтровальный материал вместе с защитной сеткой начал раздуваться перпендикулярно потоку воздуха и воды (Рис.3.90). Тест продолжался до достижения давления 2651 Па, после чего началось резкое снижения давления, вызванное массовой течью воды из фильтра.



а

б

Рис.3.90. Фильтр №1: а- протечка воды и прогиб корпуса; б- вздутие защитной сетки

После проведения тестов на водостойкость был выполнен внешний осмотр обоих фильтров тонкой очистки. На фильтре № 1 было зафиксировано вздутие (пузырчатость) синтетической защитной сетки на чистой стороне воздуха, что говорит о неплотной фиксации ею фильтровального материала (Рис.3.90б). При осмотре фильтра № 2 внешних повреждений обнаружено не было.

Для выяснения причин различного поведения фильтров во время тестирования на водостойкость было принято решение о их препарировании. На Рис.3.91 изображен вскрытый фильтр тонкой очистки № 1. Как отчетливо видно на Рис.3.91а имела место деформация плиссированного фильтровального материала в средней и задней части V-образной секции фильтра в результате воздействия водяного тумана. Оптимальное расстояние между горизонтально уложенной плиссировкой фильтровального материала нарушено: в одном месте это расстояние увеличено, в другом – отсутствует из-за прижатия влагой плиссировки друг другу. Безусловно, этот факт повлияет на эффективность очистки воздуха от твердых частиц и приведет к снижению класса фильтра.



а

б

Рис.3.91. Фильтр №1 компании Е: а- состояние фильтровального материала после теста на водостойкость; б- отсутствие фиксации фильтровального материала и защитной сетки

Эта картина полностью соответствует утверждению производителей фильтров тонкой очистки с вертикальной укладкой фильтровального материала. Влага, поступающая в фильтры с горизонтальной укладкой вместе с потока воздуха, первоначально скапливается в задней части V- образных секций фильтра, что приводит к деформации плиссированного фильтровального материала. По мере поступления воды, деформация фильтровального материала перемещается на вход фильтра и в боковые стороны (фильтр раздувается). В результате этого происходит деформация пластмассового основания части V- образной секции фильтра, что говорит о недостаточной жесткости конструкции всего фильтр – элемента.

Особого рассмотрения заслуживает, так называемое, раздутие фильтра, т.е. деформация фильтровального материала под углом 90^0 к оси потока воздуха. Для предотвращения этого явления предусмотрена защитная сетка (решетка) на чистой стороне воздуха фильтра тонкой очистки. У фильтра № 1 она синтетическая, а у фильтра № 2- пластмассовая.

На Рис.3.92б изображено крепление синтетической защитной сетки с рамкой фильтра № 1. Как отчетливо видно на представленной фотографии, в углах корпуса фильтра отсутствует клей (герметик), что снижает прочность фиксации защитной сетки. Кроме того, синтетическая защитная сетка неплотно прилегала к фильтровальному материалу, образуя гофры (см. Рис.3.91б). В результате чего, фильтровальный материал при набухании водой имеет возможность деформироваться в боковые стороны (разбухать).

На рис.3.76а представлен срез V- образной секции фильтра № 2. Как видно из

представленного фото, повреждений фильтровального материала или изменения расстояния между плиссировкой не зафиксировано. На этом же рисунке отчетливо видно крепление пластмассовой защитной решетки к корпусу фильтра № 2. В отличие от фильтра № 1, защитная решетка крепится с помощью специальных крючков, запрессованных в корпус фильтра.



Рис.3.92. Пластмассовая защитная сетка кассетного фильтра шведской компании С: а- фиксация; б- проверка на прочность

Для иллюстрации надежности крепления и прочности пластмассовой защитной сетки, была сделана попытка оторвать ее на препарированном фильтре (Рис.3.92б). Даже на разрезанном фильтре, при нарушенной целостности конструкции фильтра, эта попытка не увенчалась успехом. Безусловно, что такая система фиксации защитной пластмассовой решетки более надежна, чем у фильтра № 1.

Настало время подвести итог: какой из фильтров тонкой очистки в полной мере соответствует требованиям производителя ГТУ и КБОУ?

В соответствии с Reference Specification for air intake systems for gas turbines of types SGTX-(SIL); SGTX-(ANN), Siemens начальный перепад давления на фильтрах тонкой очистки каласса F9 не должен превышать 100 Па.

Как видно из представленных в Табл.3.14 сравнительных данных, ни один из фильтров в полной мере не соответствует требованиям производителей ГТУ компании Siemens и КБОУ FAIST AIS. Фильтр №2 шведской компании С не проходил по начальному перепаду давления, фильтр №1 немецкой компании Е по всем остальным параметрам. Необходимо обратить внимание, что разность начального перепада давления на образцах

обусловлена большей площадью фильтрации у образца № 1 и вертикальной укладкой фильтрационного материала у образца № 2.

Табл.3.14. Сравнение технических характеристик фильтров тонкой очистки

Требования к фильтрам	№ 1 (компания E)	№ 2 (компания C)
Начальный перепад давления < 100 Па	Да	Нет
Вертикальная укладка фильтровального материала	Нет	Да
Жесткая, хорошо закрепленная пластмассовая защитная решетка на чистой стороне воздуха	Нет	Да
Давление на разрыв в сухом и мокром состоянии > 6000 Па	Нет	Да

Каждый пользователь воздушных фильтров, исходя из климатических условий эксплуатации, может определить для себя, что для него важнее: надежность ГТУ или потери, вызванные перепадом давления.

Помимо способа укладки фильтровального материала существенное влияние на надежность воздушного фильтр элемента оказывает глубина плиссированной складки [25]. Стекловолоконистые материалы имеют хорошее соотношение перепада давления к эффективности, однако обладают более низкой механической прочностью по сравнению с синтетическими материалами. Поэтому производителям фильтров приходится изобретать сложные конструкции с целью преодолеть невысокую степень механической прочности. Самым распространенным способом установки стекловолоконистого материала в кассетный фильтр является конструкция миниплит (mini pleat) с клеевыми каплями по обеим сторонам. Обычно глубина складки здесь составляет от 30 до 40 мм. В отличие от многих фильтров, в кассетных фильтрах Viledon MaxiPleat немецкой компании FFT используются складки глубиной в 250 мм. Конструкция MaxiPleat обеспечивает особую механическую прочность.

На Рис.3.93 дано схематическое изображение поперечного сечения комплектов mini pleat и MaxiPleat. Скорость потока воздуха, проходящего через фильтр, приводит к перепаду давления, которое действует как сила на комплект складок. Секционный модуль можно использовать для оценки механической прочности комплекта складок.

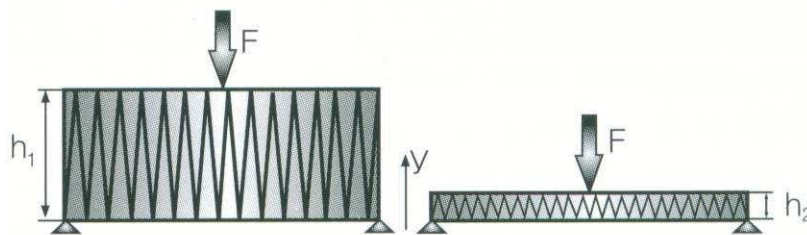


Рис.3.93. Сравнение MaxiPleat с minipleat

Формула секционного модуля для прямоугольного поперечного сечения следующая:

$$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

где b – это ширина комплекта складок, h – глубина комплекта складок MaxiPleat в 6 раз превышает глубину mini pleat, секционный модуль оказывается в 36 раз выше. Принимая это во внимание, становится очевидным, что механическая прочность конструкции MaxiPleat превосходит mini pleat. Фактически же, это лишь расчеты, поскольку комплекты складок не являются сплошной структурой. Но эта оценка дает хорошее понимание физических правил для расчета механической прочности. Кроме того, эти расчеты нашли свое подтверждение в процессе эксплуатации кассетных фильтров minipleat компании E на электростанциях во многих странах мира. Проблемы с кассетными фильтрами с minipleat, вызванные разрывом фильтрующего материала из-за недостаточной механической прочности были отмечены на электростанциях [2]:

1. Bowin (Таиланд). ГТУ - GT26 Alstom.
2. Bangbo (Таиланд). ГТУ- GT26 Alstom.
3. Pulau Seraya (Сингапур). ГТУ V94.3A2 Siemens.
4. Santa Rita/San Lorenzo (Филиппины). ГТУ V84.3A2 Siemens.
5. Glow Suez (Таиланд). Газовая турбина - GT F6.
6. Tri Energy (Таиланд). Газовая турбина – GT F9FA.

Массовое повреждение кассетных фильтров с minipleat компании E привело к остановке этих электростанций, огромным материальным потерям из-за вынужденного простоя (Рис.3.94). Естественно, что низкая надежность кассетных фильтров с minipleat побудила операторов электростанций и производителей газовых турбин искать поставщика более надежных кассетных фильтров. После сравнения технических характеристик воздушных фильтров различных производителей и выполненных тестов, в качестве фильтров тонкой

очистки на этих электростанциях были выбраны кассетные фильтры торговой марки Viledon с MaxiPleat компании FFT.



Рис.3.94. Массовое разрушение фильтров компании E с minipleat

Следует заметить, что большинство производителей воздушных фильтров используют плиссированную укладку фильтровального материала minipleat.

Одной из рекомендаций компании FAIST AIS для своих КБОУ было тестирование воздушных кассетных фильтров на водостойкость. Для прохождения этого теста необходимо залить в V-образную секцию компактного фильтра воду до уровня 250 мм (для фильтра глубиной 292 мм) и 350 мм (для фильтров глубиной 400/440 мм), с целью убедиться в отсутствии протечек в течение, по крайней мере, 30-60 минут. Вес залитой воды оказывает значительное гидростатическое давление на донную часть V –образной секции фильтра. Таким образом, задачей теста является не только подтверждение водостойкости, но и общей целостности конструкции фильтра.

В 2017 году в Великобритании на базе лаборатории независимой фирмы (не занимающейся производством воздушных фильтров) авторами книги при участии представителя компании FAIST AIS были проведены статические испытания воздушных фильтров ряда известных производителей этой продукции. Эти испытания представляли собой тестирование компактных фильтров на водостойкость, согласно методике, предложенной компанией FAIST AIS [38].

Параметры, испытанных фильтров, которым присвоены условные обозначения, представлены в Табл.3.15.

Табл.3.15. Характеристики испытанных фильтров

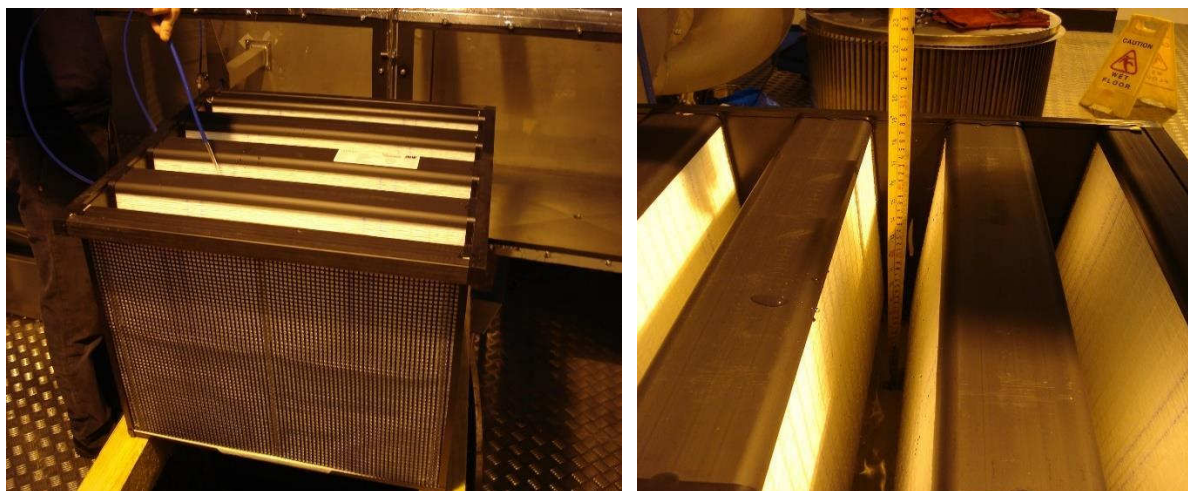
Обозначение образца фильтра	Класс очистки	Размеры фильтра (мм)	Укладка плиссированного материала	Тип плиссированного материала	Материал фильтровального материала*
А	M6	592x592x440	Вертикальная	Мини плит	Водостойкое микро стекловолокно
С	F9	592x592x292	Вертикальная	Мини плит	Водостойкое микро стекловолокно
Е	F9	592x592x400	Горизонтальная	Мини плит	Гидрофобное микро стекловолокно
FFT1	F7	592x592x292	Вертикальная	Макси плит	Микро стекловолокно с гидрофобным покрытием
FFT2	E10	593x593x420	Вертикальная	Мини плит	Высокопрочная синтетика и микро стекловолокно с гидрофобным покрытием
Ф	F9	592x592x400	Горизонтальная	Мини плит	Микро стекловолокно
М	E10	592x592x440	Вертикальная	Мини плит	Гидрофобное микро стекловолокно

*данная информация взята из паспортов фильтров и с официальных web сайтов производителей

Как отмечалось нами ранее, фильтры тонкой очистки с вертикальной укладкой фильтровального материала, безусловно, имеют преимущество по сравнению с фильтрами с горизонтальной укладкой в процессе предотвращения попадания атмосферной влаги вместе с цикловым воздухом в проточную часть ГТУ. Однако, надо иметь ввиду, что начальный перепад давления на этих фильтрах выше, чем на фильтрах с горизонтальной укладкой фильтровального материала по понятным причинам. Поэтому целесообразность применения фильтров с вертикальной укладкой фильтровального материала должна быть обусловлена тяжелыми климатическими условиями окружающей среды (повышенной влажностью), в которой эксплуатируется данная конкретная ГТУ и невозможностью снизить водность потока циклового воздуха с помощью коагуляторов. Такие условия эксплуатации имеют место не только в странах с повышенной влажностью воздуха (например, как Бангладеш, Малазия, Индонезия), но и в российских условиях, когда, например, несколько градирен расположены непосредственно рядом с всасом КВОУ ГТУ.

Рассмотрим результаты статических испытаний компактных фильтров на водостойкость. Подача воды осуществлялась в одну из V-образных секций фильтра (Рис.3.95а), уровень

заполнения которой контролировался линейкой (Рис.3.95б). Момент протечки воды из фильтра фиксировался видео и фотоаппаратурой, а также визуально.



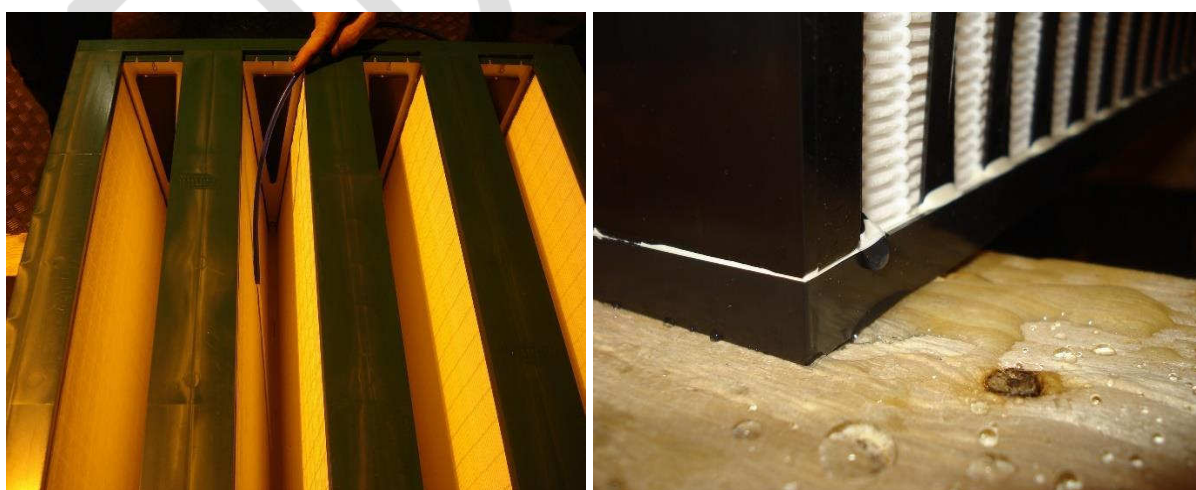
а

б

Рис.3.95. Тестирование образца А: а- заполнение водой; б- определение уровня воды

На Рис.3.95а зафиксирован момент подачи воды в фильтр А (США) средней очистки класса М6. Размеры фильтра и укладка фильтровального материала образца А выполнены в соответствии с рекомендациями компании FAIST AIS. Защитная сетка на чистой стороне воздуха фильтра изготовлена из пластмассы. Однако, заполнить водой секцию фильтра до уровня 350 мм не удалось, поскольку протечка влаги через стык фильтровального материала и корпус фильтра началась через 20 секунд после начала подачи воды.

На Рис.3.96 показаны моменты подачи воды в образец С (а) и ее течь из фильтра (б).



а

б

Рис.3.96. Тестирование шведского фильтра С: а- подача воды; б- течь воды

Размеры фильтра, укладка фильтровального материала и защитная сетка этого фильтра выполнены в соответствии с рекомендациями компании FAIST AIS. Через 1 минуту после заполнения водой одной из секций фильтра до уровня 150 мм, была зафиксирована протечка воды через стык фильтровального материала и рамки фильтра (Рис.3.96б).

Таким образом, образцы американского фильтра А и шведского С дали течь еще до момента заполнения их секций водой на рекомендованные уровни 350 мм и 250 мм соответственно. В обоих случаях протечки воды были обнаружены на стыках фильтровального материала и рамки фильтров.

Далее были протестированы два образца фильтров FFT1 и FFT2 одного и того же немецкого производителя этой продукции (Рис.3.97). Этот фактор является основополагающим, поскольку оборудование, культура производства, контроль качества выпускаемой продукции в данном случае являются идентичными.

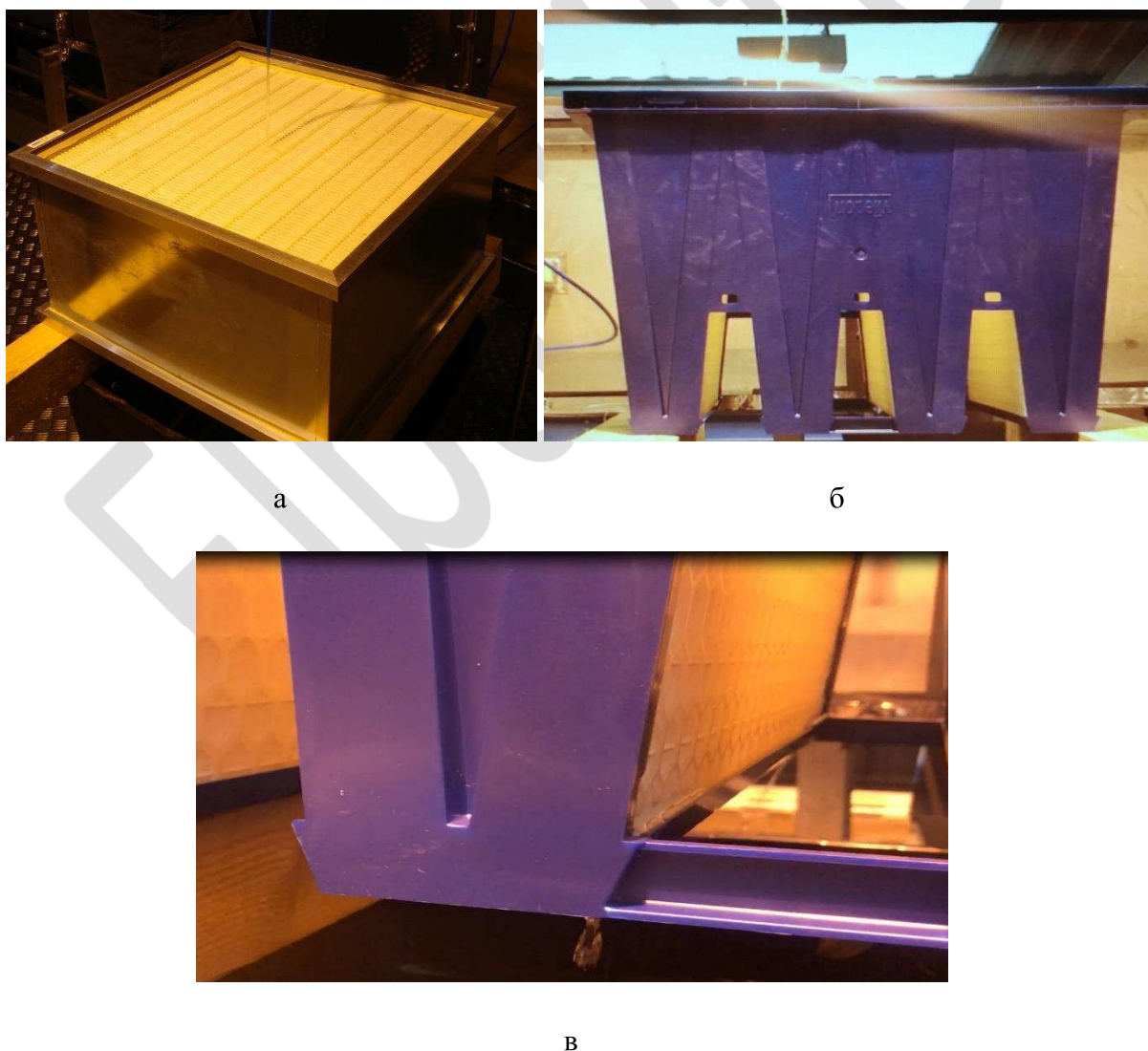


Рис.3.97. Тестирование фильтров: а- FFT1; б- FFT2; в – первая капля воды из FFT2

При этом, несмотря на свою однородность, образцы отличаются друг от друга типом фильтровального материала, его плиссировкой, классом очистки и радиальными размерами (площадью фильтрации). Таким образом, появлялась возможность сравнить на водостойкость две технологии формирования фильтр - элементов фильтрующим материалом, применяемые одним производителем.

Оценку конструкции образца FFT1 дать не представлялось возможным, поскольку он не имеет V-образных секций, корпус фильтра металлический, а не пластмассовый и у него отсутствует защитная сетка на чистой стороне воздуха. Следовательно, он не может быть использован как конечный (финальный) фильтр тонкой очистки циклового воздуха ГТУ. Конструктивное исполнение образца фильтра FFT2, по мнению производителя КБОУ, не соответствует их рекомендациям, поскольку пластмассовая решетка на чистой стороне фильтра недостаточно фиксирует фильтровальный материал. При наполнении водой секции, образец фильтра FFT2 дал течь практически мгновенно с подачей воды через 5 сек (Рис.3.97в), а образец FFT1 – через 10 сек. Причем, интенсивность протечки была пропорциональна количеству поступающей воды в секцию фильтра, поэтому достичь рекомендуемого уровня воды в фильтрах не удалось. К сожалению, при таких, практически идентичных результатах, нам трудно было оценить преимущество в водостойкости одной из двух технологий формирования фильтр - элементов фильтрующим материалом.

Образец турецкого фильтра М был признан полностью соответствующим рекомендациям компании FAIST AIS. Во время его тестирования было осуществлено заполнение водой V-образной секции до рекомендуемого уровня 350 мм. Первая капля протечки появилась через 5 минут через уплотнение на стыке фильтровального материала и рамки фильтра (Рис.3.98).

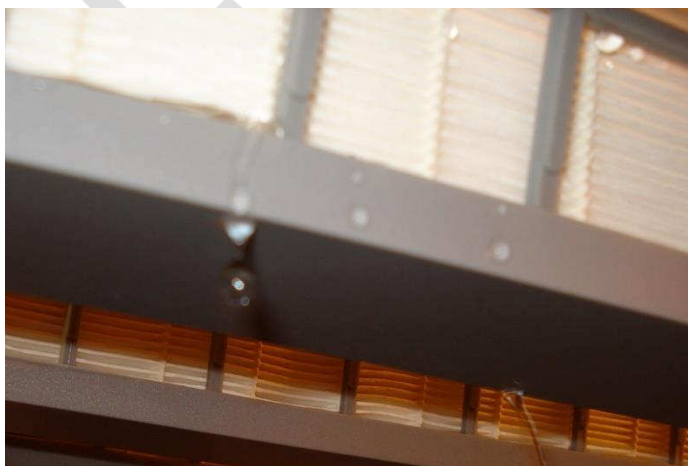


Рис.3.98. Момент протечки воды из образца М

Протечка воды была незначительной, уровень воды в V-образной секции практически не снижался, поэтому после окончания испытаний воду из фильтра пришлось выливать. Однако, несмотря на это, тест показал дефект герметизации стыка фильтровального материала и рамки фильтра.

Для испытания фильтров немецкой компании Е и отечественной Ф нами было предложено подкрашивать подаваемую в образец воду красителем для визуализации уровня заполнения V-образных секций и мест появления протечек. Это предложение было поддержано компанией FAIST AIS, поскольку определение мест протечек бесцветной воды на белом фильтровальном материале являлось затруднительным. В качестве красителя нами была предложена красная гуашь, которая не является агрессивным химическим средством, например, как марганцовка, и хорошо видна на белом фоне фильтровального материала.

На Рис.3.99а зафиксирован уровень подкрашенной воды (45 мм) в V-образной секции образца Е, при котором через 26 секунд с момента начала теста были обнаружены протечки влаги. На Рис.3.99б отчетливо видно, что протекание воды осуществляется не только через стыки фильтровального материала и рамки фильтра, но и через сам фильтровальный материал.

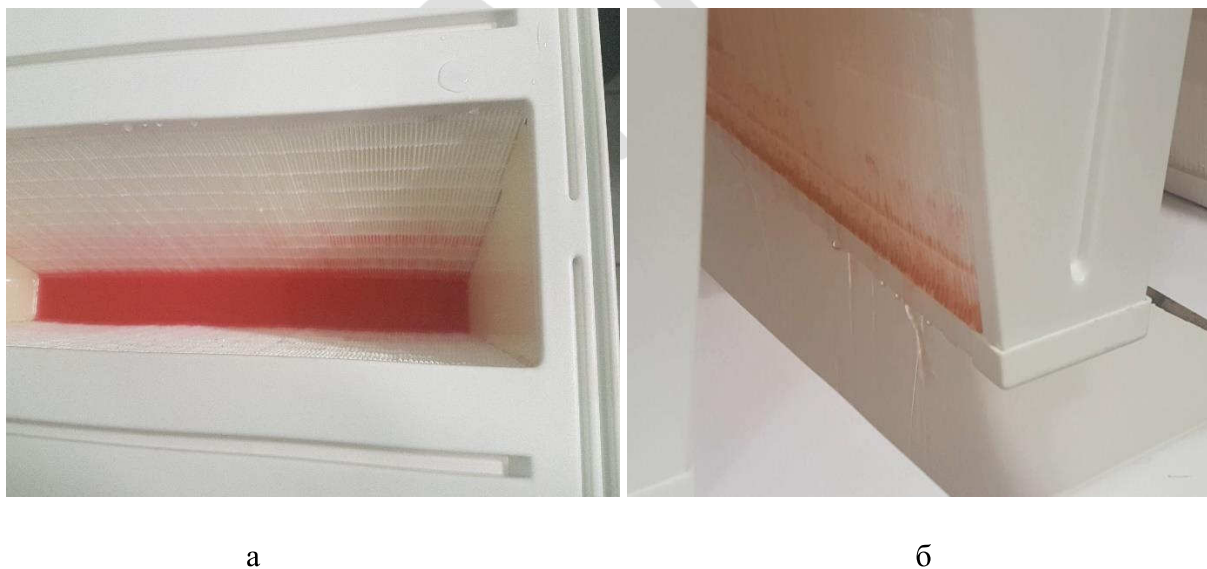


Рис.3.99. Тестирование образца Е: а- уровень подкрашенной воды; б-течь воды из фильтра

Причем протечки влаги представляют собой водяные струи, что говорит о существенных проблемах, как с герметичностью фильтра, так и с его фильтровальным материалом. После окончания теста фильтровальный материал, в местах протечки, представлял из себя рыхлую массу волокна, о резистентности которого трудно было судить.

На образце отечественного фильтра Ф процесс появления протечки отличался от предыдущего образца. Через 22 секунды после начала подачи воды в V-образную секцию появилась первая капля протекания подкрашенной воды через фильтровальный материал. По мере продолжения подачи воды интенсивность и характер протечек изменился. Вода стала проникать не только через фильтровальный материал, но и через герметизированные стыки плиссированного материала и рамки фильтра. При достижении уровня 240 мм в V-образной секции (Рис.3.100а), вода хлынула сплошным потоком через фильтровальный материал и герметичные уплотнения фильтра (Рис.3.100б).



а

б

Рис.3.100. Тестирование образца Ф: а-уровень подкрашенной воды; б-течь воды из фильтра

Следует отметить, что **образцы фильтров Е и Ф полностью не соответствуют** рекомендациям производителя КВОУ компании FAIST AIS. Они имеют горизонтальную укладку фильтровального материала, у них отсутствует пластмассовая защитная решетка на чистой стороне воздуха.

В Табл.3.16 представлены результаты по определению водостойкости протестированных фильтров. Из полученных данных видно, что самые низкие показатели имеют образцы фильтров FFT1 и FFT2. Как отмечалось ранее, эти образцы фильтров не соответствуют рекомендациям производителя КВОУ по нескольким показателям.

Табл.3.16. Водостойкость тестированных фильтров

Обозначение образца фильтров	А	С	Е	FFT1	FFT2	Ф	М
Время до протечки воды (сек)	20	60	26	10	5	22	300

Авторы находятся в постоянном контакте с ведущими компаниями, производящими воздушные фильтры. Производители образца фильтра FFT2 сообщили нам, что они уже усовершенствовали дизайн своей новой продукции и значительно усилили решетку, защищающую фильтровальный материал.

Образцы фильтров С и М полностью соответствуют конструктивным требованиям компании FAIST AIS. Они показали наилучшие результаты по водостойкости. У них не зафиксирована течь воды через фильтровальный материал, что говорит о правильном выборе гидрофобного стекловолокна и его вертикальной укладке, предотвращающей поступление атмосферной влаги в проточную часть ГТУ. Недостатком именно этих образцов фильтров является дефект в герметичности стыков фильтровального материала и рамки фильтра.

Помимо определения водостойкости кассетных фильтров, изготовленных по традиционным технологиям, тестирования был подвергнут кассетный фильтр с запатентованной мембранной технологией (Рис.3.101а) американской компании Gore (G) класса E12 (Рис.3.101б).

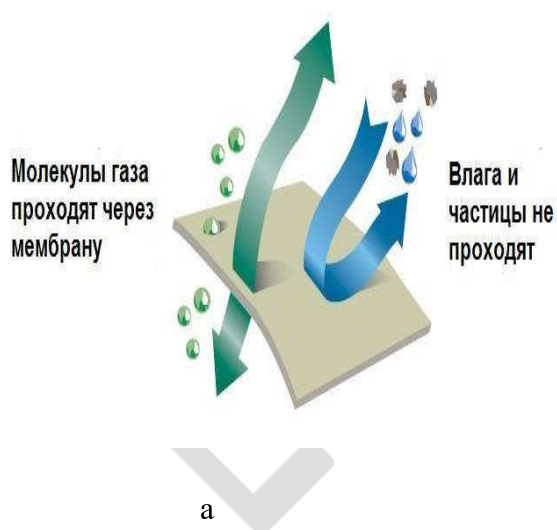


Рис.3.101. Мембранная технологии компании G: а- принцип фильтрации; б- фильтр E12

Тестирование фильтра G класса E12 продолжалось в течении 30 минут. Ни в процессе испытания, ни после его окончания протечек воды ни через фильтровальный материал, ни через стык фильтровального материала с корпусом рамки не было зафиксировано.

Мембранные технологии на данный момент являются лучшей защитой от атмосферной влаги энергетических ГТУ. Однако, следует помнить, что стоимость таких фильтров в несколько раз выше, чем у фильтров с традиционной технологией изготовления.

Авторы отмечают, что представленные результаты испытаний на водостойкость соответствуют только образцам тестируемых фильтров и не могут быть распространены на аналогичные фильтр элементы. Можно предположить, что наибольшие проблемы при прохождении теста на водостойкость будут испытывать фильтры с горизонтальной укладкой фильтровального материала.

Предложенный компанией FAIST AIS тест по определению водостойкости воздушных фильтров для КВОУ дает уникальную возможность в кратчайший срок осуществить определение проблем в технологии сборки и конструкции фильтр элементов.

В ближайшие годы планируется ввести в действие новый раздел стандарта ISO 29461 с требованием проведения теста на разрыв воздушных фильтров. Однако, аналогичные испытания для кассетных фильтров ряда иностранных производителей были проведены нами еще в 2017-2018 годах [39].

Важными требованиями к конструкции фильтров тонкой очистки (ФТО) является наличие прочной пластмассовой рамки (не подвержена коррозии) и защитной сетки (решетки) со стороны выхода воздуха. В случае разрушения фильтровального материала защитная сетка не позволит ему покинуть пределы фильтра и попасть в проточную часть ГТУ. Но, как показывает опыт эксплуатации воздушных фильтров в системах фильтрации циклового воздуха электроэнергетических ГТУ, имеют место случаи разрушения кассетных фильтров тонкой очистки. На Рис.3.102 показаны трещины пластмассовых корпусов фильтров компании E, обнаруженных в КВОУ.



а

б

Рис.3.102. Повреждение кассетных фильтров в процессе эксплуатации: а- трещина корпуса между V- образными секциями; б – трещина по месту соединения V-образных секций

На Рис.3.103 зафиксировано разрушение фильтровального материала ФТО, где хорошо видно, что причиной разрушения и выпадения фильтровального материала из рамки фильтра является отрыв защитной сетки на стороне выходы воздуха. Разрушение пластмассовых рамок и фильтровального материала фильтр элементов при работающих ГТУ может привести к попадая этих предметов в проточную часть ГТУ. Последствия попадания постороннего предмета в проточную часть осевого компрессора ГТУ представлены на Рис.3.104 [39].

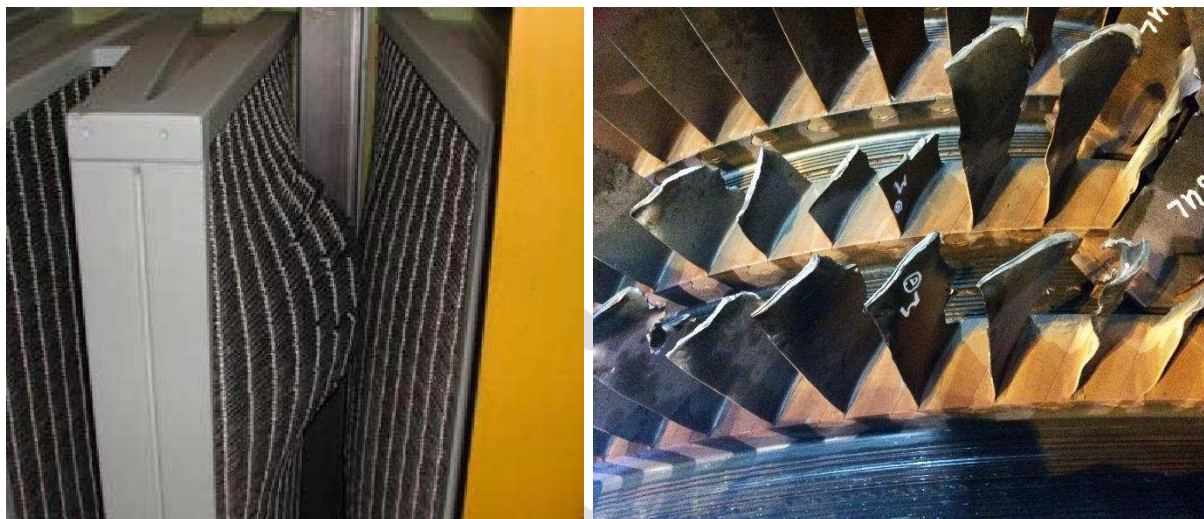


Рис.3.103.Разрушение ФТО компании Е Рис.3.104. Сломанные лопатки компрессора ГТУ

После приведенных фото еще раз становится очевидным требования стандартов и ГОСТ: «конструкцией фильтра в сборе должна быть обеспечена устойчивость к механическим воздействиям, которые могут иметь место при обычной эксплуатации». Поэтому, важнейшим требованием к ФТО, используемым для очистки циклового воздуха энергетических ГТУ, является давление на разрыв. К сожалению, минимальная величина давления на разрыв не отражена ни в действующих, ни в новых стандартах по воздушным фильтрам. Таким образом, производители воздушных фильтров сами определяют величину давления на разрыв.

Ниже приведены данные, какие величины перепада давления на разрыв указывают различные производители в паспортах кассетных воздушных фильтров тонкой очистки. Компания Е: ≥ 5000 Па, М: ≥ 6000 Па, Ф: ≥ 7000 Па, С: ≥ 6000 Па. Понятно, что чем выше значение давления на разрыв, тем более надежным может считаться воздушный фильтр. Другое дело, важно знать, при каких условиях тестирования фильтр элемента получены эти результаты (в сухом или влажном состоянии) и соответствуют ли заявленные величины фактическим значениям. Как уже отмечалось, компания FAIST AIS, настаивает на том, что фильтры должны выдерживать давление на разрыв **в сухом и**

влажном состоянии более 6000 Па.

При этом некоторые производители воздушных фильтров тонкой очистки вообще не указывают в паспортах фильтров их давление на разрыв, ссылаясь на то, что на данный момент этот параметр не является обязательным для воздушных фильтров.

Ниже мы приводим результаты тестирования воздушных кассетных фильтров на разрыв в зарубежных независимых институтах, а также на специализированных испытательных установках. Целью этого тестирования являлось определение фактического давления на разрыв, которое может выдержать совершенно сухой фильтр, и сравнение его со значением, указанным в паспорте фильтр элемента. Тестированию были подвержены несколько кассетных фильтров тонкой очистки различных производителей.

Методика тестирования [39]

Данный метод тестирования позволяет оценить механическую прочность фильтра в соответствии с перепадом давления при номинальном расходе воздуха. Фильтр подвергается пылевой нагрузке для постепенного увеличения перепада давления. Визуальный осмотр фильтра используется для определения повреждений фильтра при различных значениях перепада давления. Если визуальных повреждений не было обнаружено, в колонку “Результат” заносится значение “Пройден” при соответствующем значении перепада давления.

Принципиальная схема установки по испытанию воздушных фильтров на разрыв изображена на Рис.3.105. Тестируемый фильтр устанавливается перед вентилятором, обеспечивающим необходимый расход воздуха. После этого на фильтр осуществляется подача высококонцентрированной эталонной пыли через специальный питатель.



Рис.3.105. Схема испытательной установки испытания воздушных фильтров на разрыв

В процессе тестирования перепад давления на фильтре возрастает по мере увеличения пылевой нагрузки. Подача пыли регулируется таким образом, чтобы перепад давления повышался с шагом 1000 Па до тех пор, пока фильтр не повредится. После каждого повышения перепада давления на шаг проводится визуальное обследование фильтра на предмет повреждения, с фиксацией его состояния фотоаппаратурой. Тестирование фильтра осуществляется до разрыва фильтра (визуальное повреждение фильтра) или по достижению максимальной мощности вентилятора испытательного стенда.

На Рис.3.106 представлен хронометраж состояния кассетного воздушного фильтра класса F9 с осевым размером 290 мм компании С в процессе тестирования, а в Табл.3.17 - результаты теста [39].

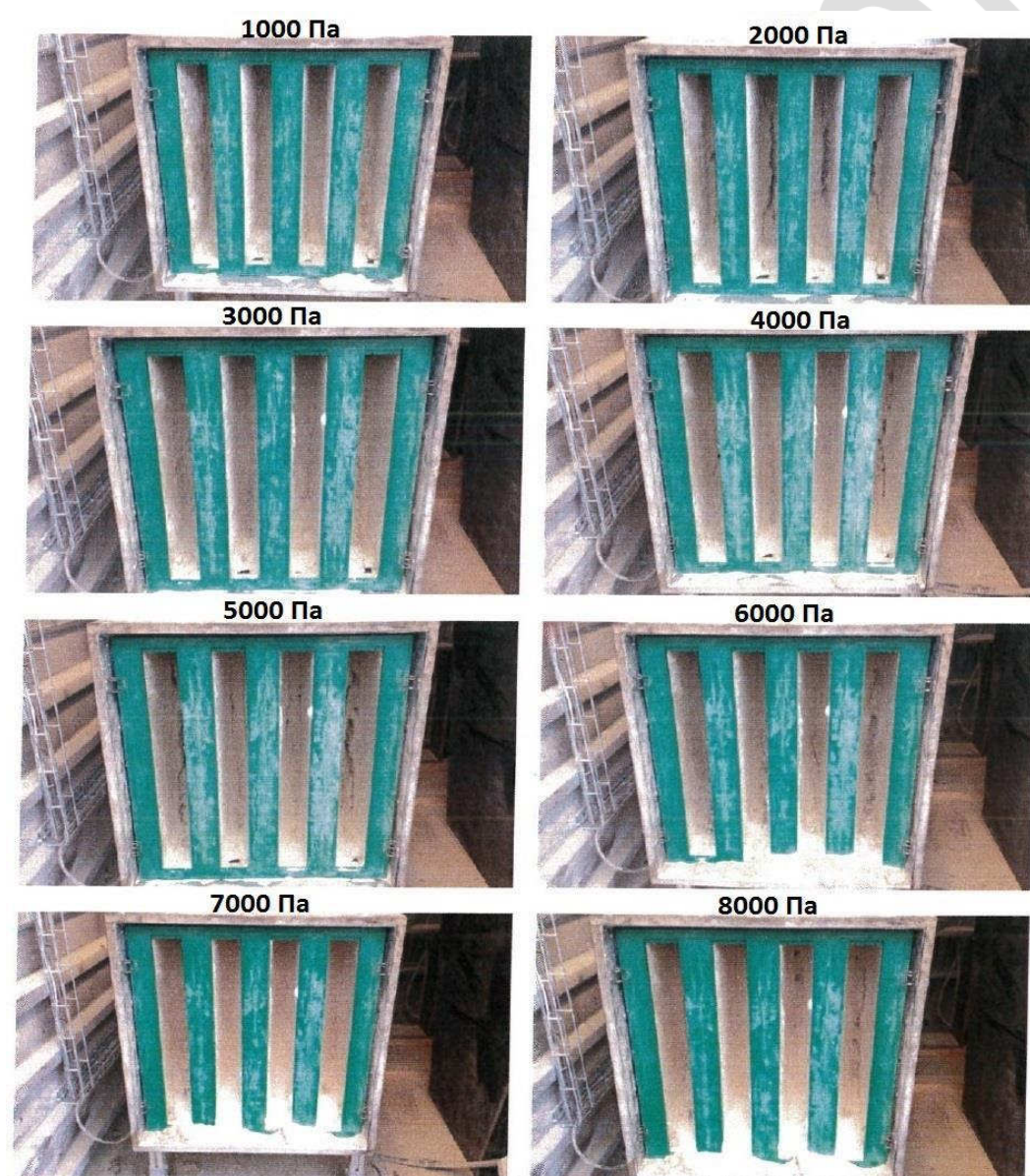


Рис.3.106. Хронометраж состояния кассетного воздушного фильтра класс F9 шведской компании С в процессе теста

Табл. 3.17. Результаты теста фильтра F9 на разрыв

Перепад давления	Пройдено/не пройдено	Комментарии
1000	Пройдено	
2000	Пройдено	
3000	Пройдено	
4000	Пройдено	
5000	Пройдено	
6000	Пройдено	
7000	Пройдено	
8000	Пройдено	<i>Достигнута максимальная мощность установки</i>

В итоге, был достигнут перепад давления 8200 Па по пределу максимальной мощности испытательного стенда. В процессе визуального осмотра повреждений фильтра не было обнаружено. Напомним, что данный тип фильтров шведской компании С имеет вертикальную укладку фильтровального материала, прочную пластмассовую рамку и решетку, надежно защищающую материал фильтра.

Как показали наши исследования, кассетные воздушные фильтры тонкой очистки с вертикальной укладкой фильтровального материала обладают большей водостойкостью, и дольше не пропускают влагу, по сравнению с фильтрами, имеющими горизонтальную укладку материала. Атмосферные аэрозоли, находящиеся во взвешенном состоянии в поступающем в фильтр воздухе, сталкиваясь с поверхностью вертикальной укладки фильтровального материала, коагулируются и, под действием силы гравитации, стекают в нижнюю часть фильтра. Поэтому кассетные воздушные фильтры тонкой очистки с вертикальной укладкой фильтровального материала компании С выдерживают давление на разрыв в 6250 Па и в смоченном состоянии. Таким образом, указанные в их паспортах значения давления на разрыв соответствует действительности.

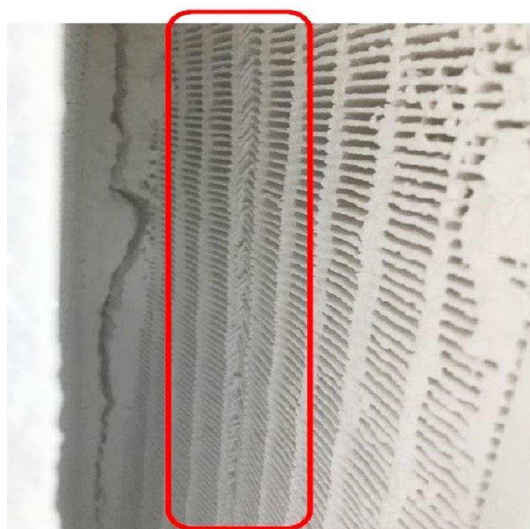
Далее тестированию на разрыв были подвержены воздушные кассетные фильтры тонкой очистки класса F7 и E11 с горизонтальной укладкой фильтровального материала компании Е. Защитная сетка фильтровального материала – синтетическая. Осевой размер ФТО класса F7 составлял 296 мм, а E11- 400 мм.

На Рис.3.107 представлено изменение состояния кассетного воздушного фильтра тонкой очистки класса F7 в зависимости от перепада давления, а в Табл.3.18 – результаты теста. Красным цветом на фотографиях обозначены выявленные проблемные места в конструкции фильтра [39].



а

2000 Па



б

3500 Па



в

Рис.3.107. Хронометраж состояния кассетного фильтра класса F7 компании E в процессе тестирования: а- перед началом тестирования; б- фильтр при перепаде давления 2000 Па; в-разрушение фильтровального материала фильтр элемента при давлении 3500 Па

Табл.3.18. Результаты теста ФТО F7 на разрыв

Перепад давления, Па	Пройдено / не пройдено	Комментарии
1000	Пройдено	
2000	Пройдено	Начал деформироваться фильтровальный материал
3000	Пройдено	Увеличение деформации фильтровального материала
3500	Не пройдено	Складки фильтровального материала разрушились

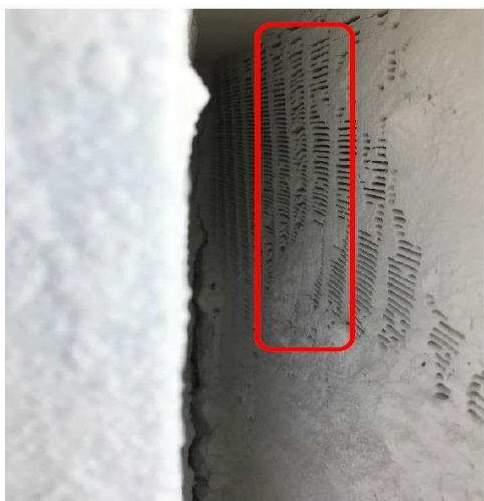
Как видно из представленных результатов теста уже при перепаде давления 2000 Па начал деформироваться фильтровальный материал. При 3000 Па деформация плиссировки материала увеличилась, а при 3500 Па произошло разрушение фильтровального материала.

Хронометраж тестирования кассетного воздушного фильтра тонкой очистки класса E11 немецкой компании E зафиксирован на Рис.3.108, а результаты теста в Табл.3.19 [39].



а

2000 Па



б

4000 Па



в

Рис.3.108. Хронометраж состояния кассетного фильтра класса E11 компании E в процессе тестирования: а- фильтр перед началом тестирования; б- фильтр при перепаде давления 2000 Па; в- разрушение фильтровального материала фильтр элемента при давлении 4000 Па.

Табл. 3.19. Результаты теста фильтра E11 на разрыв

Перепад давления, Па	Пройдено / не пройдено	Комментарии
1000	Пройдено	
2000	Пройдено	
3000	Пройдено	Начал деформироваться фильтровальный материал
4000	Не пройдено	Складки фильтровального материала разрушились

Деформирование фильтровального материала началось при 3000 Па, а при 4000 Па произошло его разрушение.

Результаты тестирования кассетных воздушных фильтров компании E различных классов очистки и типоразмеров показали, что фактическое значение давления на разрыв ниже заявленного в их паспортах. Напомним, что согласно программы испытаний на разрыв, тестировались сухие фильтр - элементы. Выполненные нами статические и динамические испытания воздушных фильтров тонкой очистки этого типа на водостойкость показали их низкую устойчивость к воздействию атмосферной влаги. На основании полученных результатов можно предполагать, что при тестировании на разрыв этих фильтров во влажном состоянии величины критического давления будут еще меньше.

Компания FAIST AIS, аттестованной компанией Siemens AG поставщик ВЗТ для ГТУ, осуществляет постоянный контроль и тестирование воздушных фильтров для своих КВОУ. На Рис.3.109 показан фильтр тонкой очистки этого типа во влажном состоянии после испытания на разрыв, который произошел при давлении 1350 Па [39].

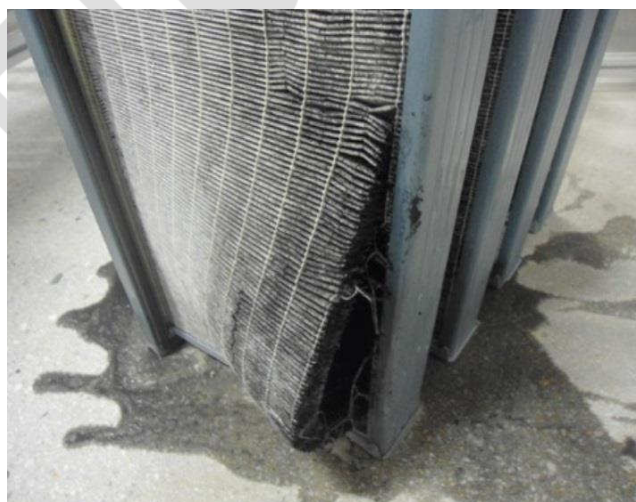


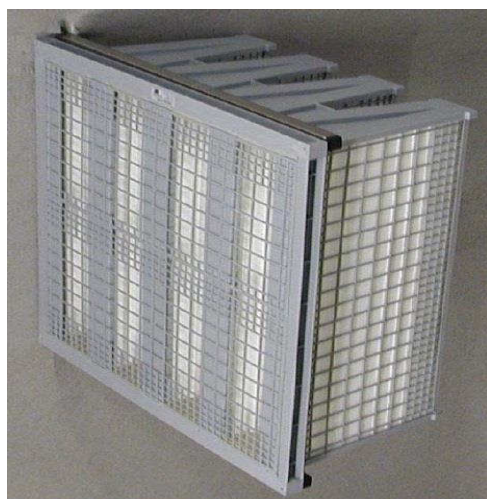
Рис.3.109. Фильтр тонкой очистки компании E во влажном состоянии после испытания на разрыв

Таким образом, выполненные исследования еще раз показали необходимость постоянного контроля паспортных технических характеристик воздушных фильтров для КВОУ энергетических ГТУ.

Резюме:

1. Воздушные кассетные фильтры тонкой очистки с вертикальной укладкой фильтровального материала и жесткими, хорошо закрепленными пластмассовыми решетками, установленными на всех V-образных сторонах фильтровального материала вниз по потоку, имеют высокий перепад давления на разрыв и, следовательно, надлежащую надежность.
2. Протестированные кассетные воздушные фильтры класса F7 и E11 с горизонтальной укладкой фильтровального материала и синтетической защитной сеткой показали несоответствие заявленным в их паспортах значениям перепада давления на разрыв фактическим величинам.
3. Перепад давления на разрыв испытанных сухих воздушных фильтров с вертикальной укладкой материала и жесткой пластмассовой решеткой более чем в два раза превышает значение аналогичной величины фильтр – элементов с горизонтальной укладкой фильтровального материала и синтетической защитной сеткой.
4. Для климатических условий с повышенной относительной влажностью атмосферного воздуха предпочтительным является использовать в качестве последней (финишной) ступени очистки циклового воздуха ГТУ воздушные кассетные фильтр - элементы тонкой очистки с вертикальной укладкой фильтровального материала и жесткой, хорошо закрепленной пластмассовой решеткой на V-образных сторонах вниз по потоку.
5. При проведении тендерных процедур с открытыми запросами предложений по закупке воздушных фильтров для энергетических ГТУ, необходимо запрашивать от поставщиков этой продукции результаты тестов на разрыв фильтр – элементов, выполненных в независимых институтах, сертифицированных по стандарту ISO/IEC 17025-2019.

Турецкая компания М выполнила тестирование кассетного фильтра тонкой очистки класса F7 в независимом институте Technical Research Center of Finland (VTT) в Финляндии. На рис.3.110 приведен хронометраж тестирования этого фильтра.



а



б



в



г



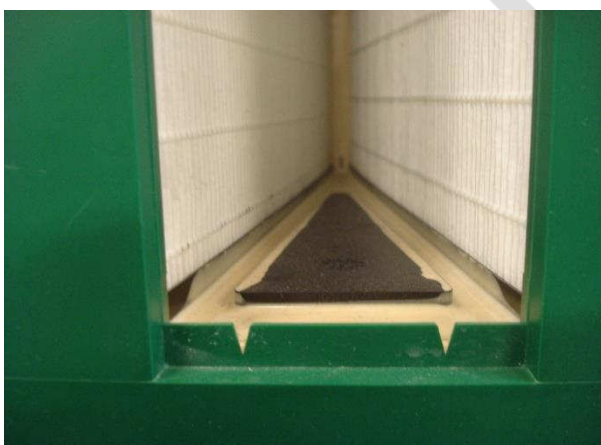
д

Рис.3.110. Хронометраж состояния кассетного фильтра класса F7 компании E в процессе тестирования: а- перед началом тестирования; б- фильтр при перепаде давления 1500 Па; в- фильтр при давлении 3000 Па; г- фильтр при давлении 4000 Па; д- фильтр при давлении 5160 Па

По итогам теста, был достигнут перепад давления 5160 Па по пределу максимальной мощности испытательного стенда. В процессе визуального осмотра повреждений фильтра не было обнаружено. Как видно, на рис.3.109 данный фильтр турецкой компании М имеет прочную пластмассовую рамку и решетку, надежно защищающую материал фильтра.

Для отвода атмосферной влаги из кассетных фильтров на грязную сторону воздуха необходимо, чтобы фильтр элементы имели спроектированную систему дренажа. При тестировании фильтров коагуляторов мы уже приводили пример такого подхода в панельном фильтре турецкой компании М. В этом фильтре был выполнен наклон поверхности канала между гофрами в сторону грязного воздуха (см. рис.3.43б). Таким образом, отсепарированная влага удалялась на грязную сторону воздуха. Другой, запатентованный подход к удалению атмосферной влаги на сторону грязного воздуха был продемонстрирован в карманных фильтрах, изготовленных по технологии DS компанией Filtair BV из Нидерландов (см. рис.3.47).

На Рис.3.111 приведены дренажные канавки ряда производителей кассетных фильтров.



а



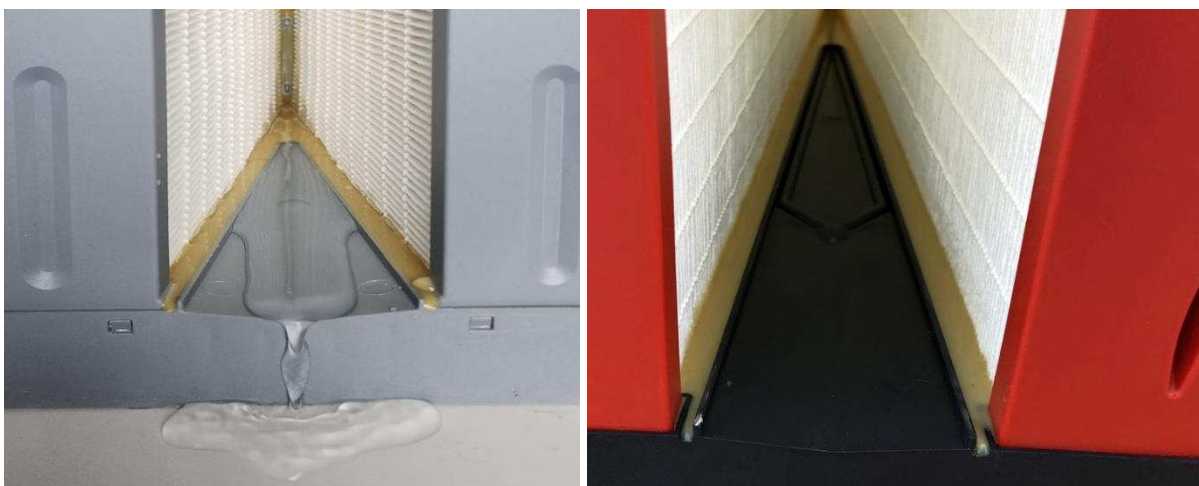
б



в



г



д

ж

Рис.3.111. Дренажные устройства кассетных фильтров: а, б – шведской компании С; в, г- немецкой компании Е; д- турецкой компании М; ж- немецкой компании FAIST AIS

Как видно из представленной информации, большинство производителей фильтров обеспечили свои кассетные фильтры дренажными канавками. Особенно отчетливо видна траектория отвода атмосферной влаги из кассетных фильтров шведской компании С (Рис.3.110б) и турецкой компании М (Рис.3.110д) на грязную сторону воздуха.

Однако, кассетный фильтр класса Е11 немецкой компании Е не имел дренажа отвода атмосферной влаги (Рис.3.110г). Таким образом, с учетом горизонтальной укладки плиссированного фильтровального материала в этом фильтре, атмосферная влага вместе с удержанной грязью по нитям, соосным с потоком воздуха, поступала в проточную энергетической ГТУ. На рис.3.110в представлена дренажная канавка кассетного фильтра класса F8 компании Е, предназначенного для реверсной установки к финишному фильтру (На этом рисунке хорошо видна уплотнительная прокладка на рамке фильтра). Таким образом, при реверсной установке этого фильтра к фильтру класса Е11, у которого нет дренажных канавок, вся влага, проникшая через фильтр класса F8, будет скапливаться внутри финишного фильтра. Такая установка фильтров может инициировать гидравлический удар собранной в финишных фильтрах влаги по лопаткам осевого компрессора энергетической ГТУ. Кроме того, как это хорошо видно на рис.3.110в, фильтр класса F8 не имеет защитной сетки внутри V-образных секциях, как это необходимо при реверсной установке фильтров. Более того, этот фильтр вообще не имеет защитных сеток ни с одной, ни с другой стороны фильтра, что является грубейшим нарушением «техники безопасности» не только для энергетических ГТУ, но и для любого оборудования использующего системы фильтрации.

На Рис.3.112а, изображены кассетные фильтры немецкой компании Е класса F8 без защитных сеток (см. рис.3.111в и 3.112б), установленные реверсно в КВОУ энергетической ГТУ на одной из отечественной ТЭЦ. На рис.3.112б отчетливо видны подтеки воды на корпусе фильтра класса F8, а при тактильном контроле зафиксировано, что фильтровальный материал мокрый.



а

б

Рис.3.112. Кассетные фильтры немецкой компании Е класса F8 без защитных сеток в КВОУ энергетической ГТУ: а- реверсная установка; б- подтеки воды на корпусе фильтра

Мы не беремся оценить это конструктивное решение, поскольку логическому объяснению оно не подлежит.

Резюме:

Устанавливать в КВОУ энергетической ГТУ воздушные фильтры без защитных сеток, с дренажем атмосферной влаги направленный в финишный фильтр, в случае разрыва которого во влажном состоянии (см.рис.3.109), его элементы попадут в глушитель шума и двигатель, как это уже было (см.рис.3.73), – это высокий риск для отечественных энергоблоков с ПГУ. Риск разрушения финишного фильтра и повреждения лопаток энергетической ГТУ многократно возрастает при использовании перед КВОУ охлаждающей установки испарительного типа (ОУ ИТ). При эксплуатации ОУ ИТ относительная влажность воздуха за ней достигает значения 97-99%, что неминуемо приведет к увеличению поступления влаги из промежуточных фильтров по дренажным канавкам в финишные фильтр элементы [41].

Истина ничуть не страдает от того,
что кто-либо ее не признает
Ф. Шиллер

Глава 4. Требования к системам фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ

В предыдущей главе, мы рассмотрели системы фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ, фильтры импульсной и статической очистки атмосферного воздуха, типы воздушных фильтров, их конструктивные особенности, различные способы укладки фильтровального материала, а также существующие и нововведенные методы тестирования фильтров, особенности их эксплуатации в зимний и летний период эксплуатации. В новой главе мы постараемся сформировать требования для систем фильтрации циклового энергетических ГТУ нашей страны, исходя из опыта эксплуатации существующих и новых технологий очистки атмосферного воздуха.

4.1. Энергоэффективность воздушных фильтров

С января 2012 года “Eurovent”, Европейских комитет в области оборудования для вентиляции и кондиционирования воздуха, предписал указывать на маркировке фильтров не только класс очистки согласно стандарта EN 779-2012, но и класс их энергоэффективности.

С этой целью все воздушные фильтры западных производителей должны проходить сертификацию компании Eurovent Certification Company (ECC). На основании тестирования фильтров этой компанией была выпущена директива Eurovent 4/11-2011[1]. Согласно этого документа, рейтинг энергоэффективности должны получить все европейские фильтр элементы с расходом воздуха 3400 м³/ч (0,944 м³/с), размерами 592 мм x 592 мм и классами эффективности G4-F9.

Воздушный фильтр сам по себе не потребляет электроэнергию, энергию потребляет вентилятор, но его потребление тем больше, чем больше сопротивление фильтра (падение давления на фильтре).

Для воздушных фильтров класс энергоэффективности определяется количеством энергии W (кВт*ч), которая потребуется вентилятору для того, чтобы «продуть» воздух через фильтр элемент.

Вычисление потребляемой мощности W производится по формуле:

$$W = \frac{q_V \cdot \overline{\Delta p} \cdot t}{\eta \cdot 1000}$$

где

$q_V = 0,944 \text{ м}^3/\text{с}$ – объемный расход воздушного потока;

$t = 6000 \text{ ч}$ - время работы;

$\eta = 0,5$ – К.П.Д вентилятора;

Δp - падение давления на фильтре.

Падение давления Δp определялось в результате тестирования фильтров. Фильтр испытывался пылью ASHRAE до конечного (финального) перепада давления для фильтров грубой очистки -250 Па, для ФСО и ФТО - 450 Па.

Как мы уже знаем из главы 1, целью стандарта EN 779:2012 являлась классификация воздушных фильтров на основании минимальной эффективности фильтрации ME (minimal efficiency) для частиц размером 0.4 мкм.

ME – минимальная эффективность фильтрации частиц 0.4 мкм; M_G , M_M , M_F – количество пыли ASHRAE использованной при испытании фильтра.

Для фильтров группы G: $M_G = 350 \text{ г}$,

Для группы M: $M_M = 250 \text{ г}$,

Для группы F: $M_F = 100 \text{ г}$.

Величины годового энергопотребления, характеризующие класс энергоэффективности для каждого класса фильтрации, была определена директивой Eurovent 4/11 -2011 [1] (Табл.4.1).

Табл.4.1.Эффективность воздушных фильтров , (кВт*ч)/год

Класс фильтров	G4	M5	M6	F7	F8	F9
ME	-	-	-	ME ≥ 35%	ME ≥ 55%	ME ≥ 70%
	$M_G = 350 \text{g ASHRAE}$	$M_M = 250 \text{g ASHRAE}$		$M_F = 100 \text{g ASHRAE}$		
A	0 – 600 kWh	0 – 650 kWh	0 – 800 kWh	0 – 1200 kWh	0 – 1600 kWh	0 – 2000 kWh
B	>600 – 700 kWh	>650 – 780 kWh	>800 – 950 kWh	>1200 – 1450 kWh	>1600 – 1950 kWh	>2000 – 2500 kWh
C	>700 – 800 kWh	>780 – 910 kWh	>950 – 110 kWh	>1450 – 1700 kWh	>1950 – 2300 kWh	>2500 – 3000 kWh
D	>800 – 900 kWh	>910 – 1040 kWh	>1100 – 1250 kWh	>1700 – 1950 kWh	>2300 – 2650 kWh	>3000 – 3500 kWh
E	>900 – 1000 kWh	>1040 – 1170 kWh	>1250 – 1400 kWh	>1950 – 2200 kWh	>2650 – 3000 kWh	>3500 – 4000 kWh
F	>1000 – 1100 kWh	>1170 – 1300 kWh	>1400 – 1550 kWh	>2200 – 2450 kWh	>3000 – 3550 kWh	>4000 – 4500 kWh
G	>1100 kWh	>1300 kWh	>1550 kWh	>2450 kWh	>3350 kWh	>4500 kWh

Фильтр элементы с наименьшим энергопотреблением получили класс А, а

энергозатратные фильтры – класс G. Класс энергоэффективности А выделялся зеленым цветом (зеленые технологии), а низший класс G – красным цветом.

У читателя может возникнуть справедливый вопрос, а причем здесь вентиляция, если мы говорим об очистке циклового воздуха ГТУ? Дело в том, что большинство западных производителей для снижения себестоимости своей продукции и обеспечения конкурентных преимуществ, поставляли на КВОУ системы фильтрации, состоящими из фильтров, предназначенных для систем вентиляции. И это, несмотря на то, что в 2013 году в Европе вступил в действие стандарт ISO 29461-1:2013. Air intake filter systems for rotary machinery. Test methods. Part 1. Static filter elements. В нашей стране этот стандарт был легализован под названием ГОСТ 58499-2019 «Системы очистки воздуха, подаваемого в роторные установки. Методы испытаний. Часть 1. Статические фильтрующие элементы». Как мы уже отмечали, что к сожалению, этот ГОСТ до настоящего времени у нас не используется. Таким, образом, для фильтров КВОУ ГТУ за рубежом долгое время использовался стандарт EN 779-2012, а в нашей стране еще продолжает использоваться ГОСТ Р EN 779:2014 для фильтров общего назначения.

Для того, чтобы оценить значение директивы Eurovent 4/11 -2011 для отчетственной электроэнергетики, проведем сравнительный анализ энергоэффективности фильтров класса А и G согласно табл.4.1 для ГТУ Siemens SGT5-4000F [2]. Базовая (поставляемая вместе с КВОУ) система фильтрации воздуха этих ГТУ состоит из трех ступеней: фильтр коагулятор (ВЛО)/ фильтр грубой очистки (ФГО)/ фильтр тонкой очистки (ФТО). Классы очистки этих фильтров соответственно G4/G4/F8. Для фильтров с энергоэффективностью классов А принималась средняя величина энергопотребления, а для класса G – минимальная, согласно табличных данных. Таким образом, фильтр G4 класса А имеет энергопотребление $E_{A4} = 300$ кВт*ч, фильтр G4 класса G- $E_{G4} = 1101$ кВт*ч; фильтр F8 класса А- $E_{A8} = 800$ кВт*ч, а фильтр F8 класса G- $E_{G8} = 3351$ кВт*ч.

В случае использования в КВОУ фильтров класса энергоэффективности G, по сравнению с фильтрами класса А, потери выработки электроэнергии ГТУ, составляют: для фильтра G4 – $\Delta E_4 = 801$ кВт*ч, а для фильтра F8- $\Delta E_8 = 2551$ кВт*ч. Умножив значение потерь электроэнергии на одном фильтре каждого класса на общее количество фильтров ($N_{ВЛО} + N_{ФГО} + N_{ФТО}$) в КВОУ получим:

1. Для фильтров G4: $\Delta E_4 * (N_{ВЛО} + N_{ФГО}) = 86\,267,7$ кВт*ч/год
2. Для фильтров F8: $\Delta E_8 * N_{ФТО} = 1\,389\,887$ кВт*ч/год
3. Итого: для КВОУ с системой фильтрации G4/G4/F8 суммарные потери электроэнергии $\sum \Delta E$ составят $1\,476\,154,7$ кВт*ч или $1\,476,16$ МВт*ч в год.

В случае взятия для расчета минимальных значений энергопотребления фильтров класса А, как и для класса G, потери выработки электроэнергии могут удвоиться и достигнуть значения -2 952,32 МВт*ч в год. Если оценить материальные потери большой энергетической компании, вызванные использованием в КВОУ ТЭЦ неэнергоэффективных воздушных фильтров, то эта величина могла достигать несколько десятков миллионов рублей в год. С другой стороны, использование воздушных фильтров с низким энергопотреблением, позволит избежать этих потерь и повысить энергоэффективность собственных генерирующих мощностей.

Позже, в процессе тестирования было установлено, что фильтры класса G (грубой очистки) малоэффективны, поэтому от их сертификации было принято отказаться. Сертификации стали обязательны воздушные фильтры классов M5- F9. Были изменены и цвета, характеризующие класс энергоэффективности. Вместе с тем, был введен высший классы энергии от А + для наиболее эффективных продуктов. Стало доступно 6 классов энергоэффективности (от А + до Е). Фильтры, прошедшие тестирование компанией ЕСС, должны иметь марктовку, подтверждающую их сертификацию. На этикетке указывается производитель фильтра, его габаритные размеры, номинальный расход воздуха, эффективность очистки по стандарту EN 779-2012, величины энергопотребления и присвоенный ему класс энергоэффективности ЕСС (Рис.4.1а).



а



б

Рис.4.1.Этикетка сertificate Eurovent фильтра Микропор: а- по стандарту EN 779-2012; б- ISO 16890

После отмены в Европе стандарта EN 779-2012, сертификация воздушных фильтров для вентиляции по энергоэффективности стала осуществляться по вступившему в силу стандарту ISO 16890 (Рис.4.1б).

Безусловно, маркировка энергоэффективности, разработанная ЕСС, на основе сертифицированных данных - это четкое и надежное решение для быстрого определения энергоэффективности продукта.

Где же инженерному персоналу отечественных ТЭЦ получить информацию о энергоэффективности зарубежных воздушных фильтров? Как и отмечалось ранее, технические характеристики фильтров должны быть представлена в их паспортах, на маркировке коробок, в которых они поступают от поставщика фильтров и на самих фильтрах. Кроме того, на официальном Web-сайте Eurovent Certification Company www.eurovent-certification.com, можно найти технические характеристики всех сертифицированных этой компанией фильтров. Среди них продукция компаний AAF International (США), Camfil (Швеция), Mikropor (Турция) и других производителей. Однако, продукция не всех европейских производителей фильтров сертифицирована этой представительной организацией. Например, воздушные фильтры немецкой компании E не сертифицированы ЕСС, а, следовательно, им не присвоен класс энергоэффективности.

Поскольку стандарт EN 779-2012 в Европейском союзе отменен, а вместо него введен в действие ISO 16890-1:2016 (ГОСТ Р 70064.1-2022), пользователям зарубежных воздушных фильтров необходимо руководствоваться новыми документами ЕСС [3]:

Eurovent 4/24 - 2023: Оценка энергопотребления воздушных фильтров для общей вентиляции - первое издание

Eurovent 4/23 - 2022: Выбор фильтров для вентиляции по стандарту EN ISO 16890 для общих приложений вентиляции -

Eurovent 4/23 - 2022: Выбор классов воздушных фильтров по стандарту EN ISO 16890 - четвертое издание

К сожалению, в нашей стране служба сертификации энергоэффективности воздушных фильтров отсутствует. Существуют трудности и с поставкой эффективных западных воздушных фильтр элементов. Но, энергоэффективные фильтры (сертифицированные ЕСС) могут без проблем поставляться отечественным потребителям компаниями из стран, являющихся партнерами нашего государства в крупных энергетических проектах, таких как «Турецкий поток» и строительство газового хаба в Турции ПАО «ГАЗПРОМ». Одним

их крупнейших мировых производителей воздушных фильтров для ГТУ и вентиляции, является турецкая компания Mikropor (Микропор).

Энергоэффективные воздушные фильтры могут использоваться для промышленной вентиляции и офисных зданий, систем очистки воздуха щеточно-контактных аппаратов турбогенераторов и других электрических машин, систем наддува тоководов, что позволит снизить затраты на собственные нужды энергетических компаний.

4.2. Реверсное крепление кассетных фильтров

Как отмечалось в главе 3, 25 апреля 2014 года была получена заявка, а затем и выдан патент № RU 145900 U1 на полезную модель «Устройство очистки воздуха (варианты)» отечественной компании Ф. В нем было предложено несколько вариантов установки фильтров в воздухоочистительные устройства (ВОУ) для газовых турбин, в том числе и реверсная установка фильтров. Приоритет этого патента начинает действовать с момента подачи заявки на изобретение, т.е. с апреля 2014 года. Однако, такая система установки воздушных фильтров в КВОУ ГТУ была известна давно и широко использовалась на зарубежных электростанциях начиная с 21 века., т.е. раньше подачи заявки на патент отечественной компанией Ф.

Один из авторов книги лично может засвидетельствовать, что еще в 2007 году вместе с представителями японской компании Kawasaki при осмотре ГТУ этой компании на электростанции в немецком городе Кайзерслаутерн зафиксировал в КВОУ (см. рис.2.49а) реверсную установку фильтров немецкой компании Е.

Компания FAIST Anlagenbau GmbH (Германия), являющаяся аттестованным поставщиком ВЗТ и воздушных фильтров для ГТУ фирмы Siemens AG, в 2021 году опубликовало статью «Комбинированные системы фильтрации воздуха ГТУ компании FAIST» [4] и Technical Information Letters (TIL) -Техническое Информационное Письмо в отечественном журнале «Газотурбинные технологии» о реверсной установке воздушных фильтров в КВОУ [5].

Одной из рекомендаций компании FAIST является реверсное крепление фильтров финишной очистки класса Е (Н), герметично соединенных с фильтрами предварительной очистки класса М (F), причем конструкция и размер каналов для выхода фильтров предварительной очистки совпадает с размерами и конструкцией каналов для входа воздуха в фильтры финишной очистки (Рис.4.2). Данная система крепления фильтров в КВОУ компании FAIST уже длительное время используется для очистки циклового воздуха ГТУ

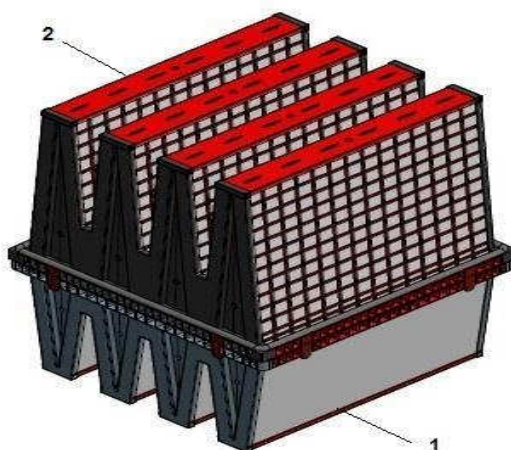


Рис.4.2. Комбинированная система фильтрации воздуха компании FAIST: 1-фильтр предварительной очистки; б- фильтр финишной очистки.

Комбинированные системы фильтрации циклового воздуха с реверсным креплением ФТО компании FAIST установлены в КБОУ мощнейшей ГТУ SGT5-8000H на электростанции Lausward в Дюссельдорфе (Германия) на энергоблоке «Фортуна» (Рис.4.3.).



Рис.4.3. Вид на КБОУ компании FAIST AIS для ГТУ SGT5-8000H энергоблока «Фортуна» электростанции Kraftwerk Lausward в Дюссельдорфе [4]

Эта электростанция побила три мировых рекорда: в ходе приемочных испытаний была достигнута максимальная электрическая мощность в 603,8 МВт, а чистая эффективность преобразования энергии (К.П.Д.) составила около 61,5%. Кроме того, энергоблок

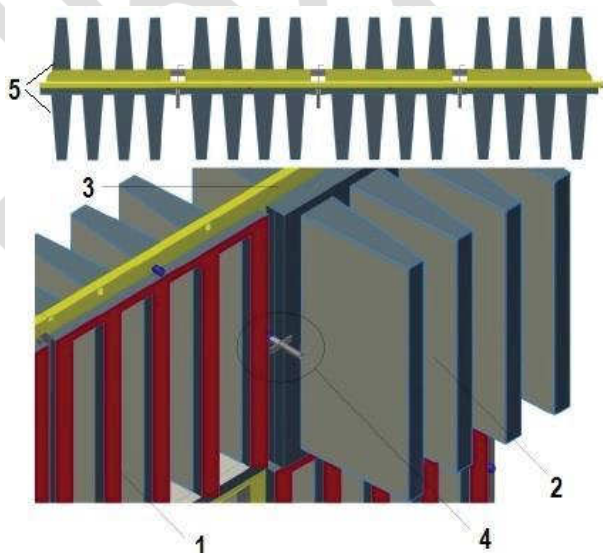
«Фортуна» может поставлять до 300 МВт для системы централизованного теплоснабжения города Дюссельдорф.

Ранее, в 2012 году, такая система фильтрации циклового воздуха в КБОУ ГТУ Siemens SGT5-3000E (V94.2A) была применена на немецком химическом предприятии BASF – Ludwigshafen (Германия).

В конце статьи компания FAIST приводит очередное Техническое Информативное Письмо (TIL), в котором приводит названия объектов и типа ГТУ на КБОУ, которых была применена система фильтрации воздуха с реверсной системой крепления фильтров компании FAIST, а также время, когда данные системы были там установлены. «Надеемся, что эта информация позволит нашим партнерам защитить свои интересы, в случае если какой – либо производитель фильтров присвоит себе право приоритета в этом вопросе».

Техническое Информационное Письмо «Компактные фильтры с монтажом в рамке- опыт внедрения» компании FAIST AIS от 22.02.2021 мы приводим дословно [5]:

«Настоящим письмом информируем, что с 2008 года мы занимаемся внедрением компактных V-образных фильтров с монтажом рамкой к рамке, то есть в такой конфигурации, когда фильтр тонкой очистки класса E (3) герметично соединен рамкой к рамке с фильтром предварительной очистки класса F (2). При этом оба фильтра состоят из V-образных фильтрующих блоков из миниплиссированного материала и каналов впуска/выпуска воздуха (1), а выпускной канал предфильтра (1) совпадает по габаритам и своему расположению со впускным каналом фильтра тонкой очистки (5):



Мы поставляли КБОУ с данной конструкцией для различных OEM-поставщиков газовых турбин, таких как Kawasaki, MTU, Siemens и конечных клиентов, к примеру, BASF, Stadtwerke и ENI.

Ниже представлен референс-лист таких проектов:

- 2009 - Kawasaki GT GPB80B – Sedamyl, Турция (OEM)
- 2012 - Rolls Royce RB211 RT 61 - Stadtwerke Munster, Германия (модернизация)
- 2012 - GE LM 2500 + G4 - MTU Sindelfingen/Daimler, Германия (модернизация)
- 2012 - Siemens SGT5-4000F - BASF Ludwigshafen, Германия (модернизация)
- 2013 - Ansaldo AE94.3A - Eni Power Ravenna, Италия (модернизация)
- 2014 - Siemens SGT5-8000H -Lausward, Германия (OEM)

Кроме того, в 2013 году в сотрудничестве с Siemens мы провели множество тестов по установке фильтров различных производителей вплотную друг к другу с целью сравнения и повышения производительности».

С уважением

Джанлука де Аркангелис

Департамент фильтрации и очистки воздуха FAIST

aftermarket@faist.de

Тел: +44 7990 515438

Из этого Технического Информационного Письма и нашего опыта от 2007 года следует, что отечественная компания Ф не может претендовать на приоритет от 25 апреля 2014 года на полезную модель «Устройство очистки воздуха (варианты)» по патенту № RU 145900 U1. Это техническое решение давно известно и успешно используется в течение многих лет во всем мире.

Авторы книги сравнивают эту ситуацию с коробком спичек. Если кто-то **купил** коробок спичек, то по идее автора патента, владелец коробка не имеет права положить коробок на бок, поставить его «на по́пá», присоединить к другим коробкам спичек и т.д., без уплаты соответствующей суммы денежных средств патентодержателю, Ситуация выглядела бы комично и неправдоподобно, если бы не было патента. Но, как мы уже сообщали в главе 3 книги, Решением Федеральной службы по интеллектуальной собственности в 2022 году патент на полезную модель №145900 U1 был признан недействительным частично и автору был выдан новый патент с уточненной формулой полезной модели.

Это поучительный урок всем тем, кто захочет присвоить себе право распоряжаться чужой собственностью, как материальной, так и интеллектуальной.

4.3. Отрицательная эффективность воздушных фильтров

В процессе многолетнего мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на различных объектах отечественной энергетики нами были зафиксированы случаи увеличения количества и концентрации частиц за воздушными фильтрами в системе фильтрации циклового воздуха ГТУ по сравнению со всасом КВОУ. Так в процессе мониторинга фильтров средней очистки (ФСО) класса М6 на КВОУ ТЭЦ в Перми было установлено увеличение количества частиц размером 0,5 мкм - 1 мкм в 6 раз за фильтрами по сравнению с этим параметром на входе в фильтр - элементы [2].

В климатических условиях г. Москва, за аналогичными карманными фильтрами класса М6 с глубиной карманов 500 мм того же производителя компании Е отмечалось увеличение количества частиц размером 0,3 мкм – 0,5 мкм в 3,4 раза (Рис.4.4), а концентрация этих частиц в 5 раз, по сравнению со всасом КВОУ (Рис.4.5) [6].

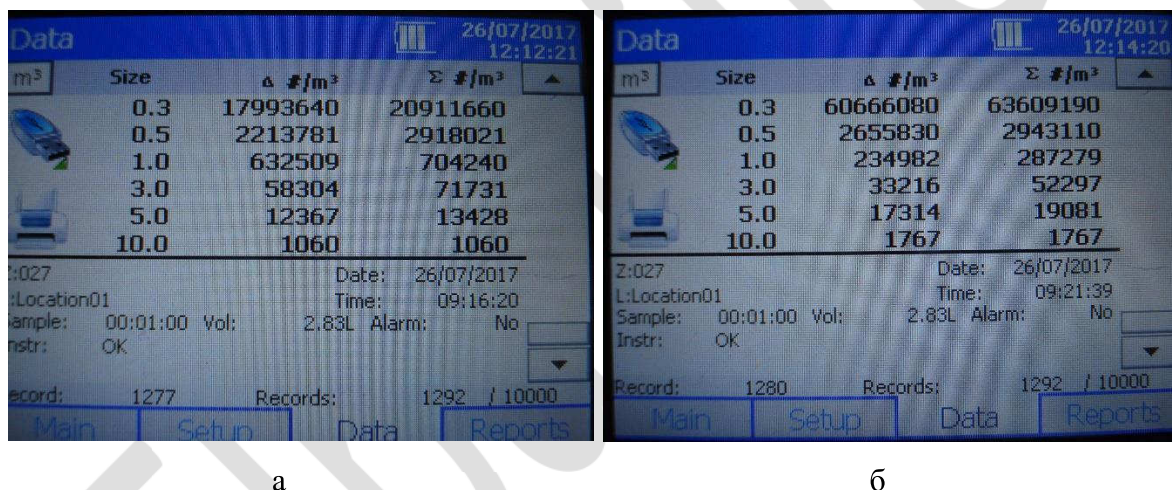


Рис.4.4. Количество частиц пыли: а- на всасе КВОУ; б- за ФСО М6

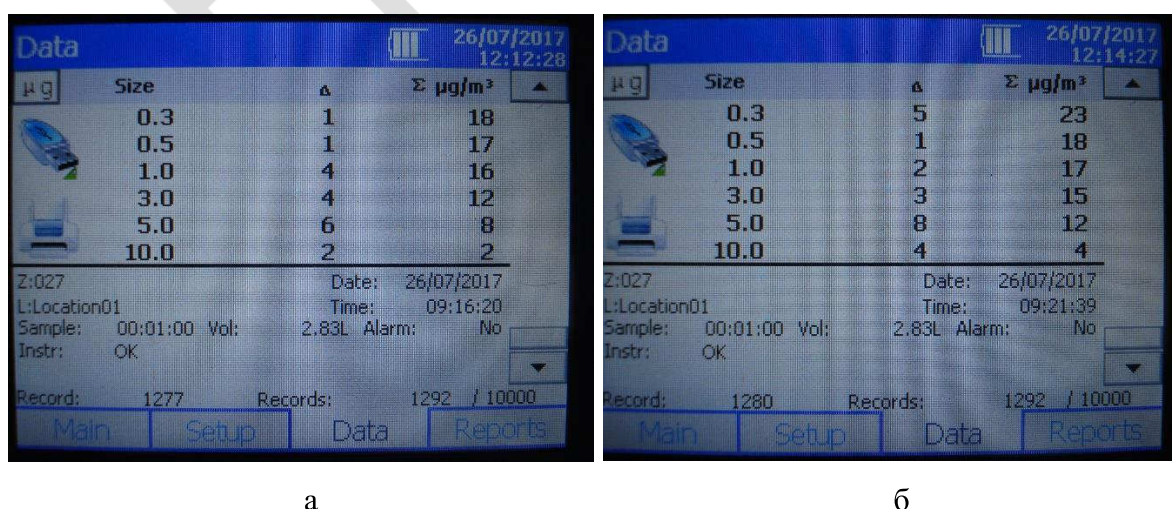


Рис. 4.5. Концентрация частиц пыли: а- на всасе КВОУ; б- за ФСО М6

Также зафиксировано увеличение количества и концентрации частиц крупной дисперсности 5 мкм и 10 мкм.

Выясним, что говорит по этому поводу российский ГОСТ Р ЕН 779-2014 “Фильтры очистки воздуха общего назначения. Определение технических характеристик”, действующий в нашей стране и которым еще пользуется большинство энергетических компаний.

Прежде всего, вспомним, область применения этого документа. В виду важности этого положения процитируем его дословно: «Настоящий стандарт устанавливает классификацию фильтров очистки воздуха общего назначения и методы определения их технических характеристик. Приводятся требования к контрольным аэрозолям, приборам и оборудованию, используемым при определении эффективности фильтров, а также к оформлению результатов испытаний.

Полученные в соответствии с требованиями настоящего стандарта результаты не могут применяться для прогнозирования эффективности при эксплуатации и срока службы. Другие влияющие на эффективность фильтрации факторы, которые должны быть учтены, описаны в приложении А».

В разделе классификация ГОСТа объясняется, что характеристики атмосферной пыли значительно отличаются от контрольного аэрозоля, используемого при испытаниях. В связи с этим по результатам испытаний трудно судить об эксплуатационных характеристиках или сроке службы. На эффективность также отрицательно влияет потеря статического заряда или **отделение частиц**.

Другими словами, всех пользователей этой продукции предупредили, что характеристики воздушных фильтров, которые были приобретены, в реальных условиях эксплуатации могут не соответствовать заявленным производителями классам очистки (эффективности). Следовательно, нет возможности прогнозировать сроки службы, замены и закупки воздушных фильтров.

Возникает риторический, но вечный русский вопрос: «Что делать?» Как планировать ремонтную подготовку оборудования и закупочную деятельность предприятия, как правильно выбрать нужные воздушные фильтры, если стандарт и ГОСТ не гарантируют их эффективной работы?

Может быть в приложение «А», посвященному факторам, влияющим на эффективность фильтрации, которые «должны быть учтены», даны разъяснения? Прежде всего, следует отметить, что это приложение имеет справочный, а не обязательный статус. Поэтому, у читателя ГОСТа вызывает некоторое недоумение несоответствие фразы: **«должны быть**

учтены» справочному характеру самого приложения.

В приложении «А» рассмотрены повторный унос и отделение частиц от фильтра. Вновь прибегаем к цитированию: «В идеальном процессе фильтрации каждая частица удерживается волокном фильтра при первом соприкосновении с ним, но другие частицы могут повлиять на уже осевшую частицу, в результате чего она может быть унесена потоком воздуха. Волокна и частицы самого фильтра также могут отделяться за счет механических сил. **Причины выделения волокон и частиц могут представлять интерес для пользователя, но их нельзя установить с помощью оптического счетчика частиц**».

Ну что ж, можем уведомить западных создателей этого стандарта и отечественных коллег, которые перевели и приняли его дословно, что нас, пользователей продукции, **очень** интересует этот вопрос, поскольку он влияет на выработку электроэнергии ГТУ. Что же дальше? Оказывается, установить эти причины с помощью оптических счетчиков невозможно. Таким образом, в ГОСТ сделана простая констатация этого факта. В терминах и определениях рассматриваемого ГОСТ дается классификация отделяющихся от фильтра волокон и частиц:

- **отскок частиц** (particle bounce): Показатель, характеризующий явление, когда соприкоснувшиеся с фильтрующим материалом частицы не удерживаются им.
- **проскок** (penetration): Отношение концентраций частиц после фильтра и до фильтра.
- **вторичный унос** (re-entrainment): Унос потоком воздуха частиц, первоначально задержанных фильтром.
- **отделение** (shedding): Попадание в поток воздуха за фильтром частиц из-за эффектов отскока и вторичного уноса частиц, а также отделения волокон или частиц от фильтра или фильтрующего материала.

Термин “**отделение**” обозначает три разных явления: отскок частиц, выделение волокон или частиц фильтрующим материалом и вторичный унос частиц. Некоторые или все эти явления с большей или меньшей вероятностью происходят в течение срока службы фильтра.

Отскок частиц

В идеальном процессе фильтрации каждая частица должна постоянно задерживаться при первом столкновении с фильтрующей поверхностью, такой как волокно фильтра, или с ранее задержанной частицей. Для мелких частиц и низких скоростей воздуха силы адгезии значительно превышают кинетическую энергию движущихся частиц в воздушном потоке, и частицы пыли, которые уже уловлены, вряд ли будут вынесены из фильтра. Увеличение

размера частиц и скорости воздуха приводит к снижению этого эффекта, например, крупные частицы “отскакивают” от волокон. Но при этом они теряют достаточно много энергии и могут быть задержаны при последующем столкновении с волокном. Однако если эффективных контактов с волокном не последует, то частицы будут теряться, т. е. будут вынесены из фильтра, что приводит к уменьшению эффективности для частиц в этом диапазоне дисперсности.

Эффект отскока частиц более заметен для фильтров группы G, чем групп M и F. Некоторые исследователи обнаружили, что для частиц с размерами от 4 до 8 мкм происходит снижение эффективности, которое может быть следствием эффекта уноса частиц [7,8].

Следует отметить, что ГОСТ Р ЕН 779-2014 не содержат способы оценки эффективности для твердых частиц с размерами более 3мкм.

Выделение волокон или частиц фильтрующим материалом

Некоторые конструкции фильтра включают в себя фильтрующий материал, также содержащий и/или генерирующий некоторые свободные волокна или частицы материала. Этот материал может быть вынесен из фильтра воздушным потоком. Степень потери волокон зависит от целостности волокнистой структуры фильтрующего материала, твердости и нестабильности пылевых нагрузок и скоростей воздуха в течение срока службы фильтра. Следует отметить, что число выделенных (вынесенных из фильтра) волокон незначительно в сравнении с полным количеством пыли, прошедшей через фильтр, в типичных для окружающей среды условиях. Эффект выделения волокон или частиц фильтрующим материалом более заметен для фильтров групп M и F, чем группы G.

Вторичный унос частиц

Если количество задержанной пыли на фильтре увеличивается, то проявляются следующие дополнительные эффекты:

- а) влетающая частица может ударить по ранее захваченной частице и выбить ее в воздушный поток;
- б) скорость воздуха в фильтрующем материале увеличивается из-за уменьшения пространства для прохода воздуха захваченными частицами. Кроме того, фильтрующий материал может сжаться из-за увеличения сопротивления воздушному потоку, и таким образом стать причиной дополнительного увеличения скорости воздуха в воздушных каналах. Это увеличение скорости воздуха может унести некоторые осажденные частицы;

в) колебания фильтрующего материала при работе фильтра вызывают перераспределение пыли, задержанной фильтрующим материалом. Колебания приводят к возрастанию уноса пыли.

Колебания фильтрующего материала могут быть вызваны следующими причинами:

- 1) нормальным воздушным потоком через фильтр при периодическом (например, ежедневном) пуске и остановке воздушных кондиционеров на объектах;
- 2) изменениями расхода воздуха, приводящими к сжатию и разрыхлению фильтрующего материала;

в) механической вибрацией.

Унос частиц по этим причинам (также называемый «вынос» или «разгрузка») может быть измерен и определен количественно [9,10], а также в соответствии с п.10.4.2

“Пылезадерживающая способность” ГОСТ Р ЕН 779:2014.

На стенде для тестирования фильтров за испытуемым фильтр элементом устанавливается финишный фильтр (более высокой эффективности), который улавливает прошедшую через него пыль.

Пылезадерживающую способность следует определять после каждого цикла подачи пыли.

При достижении каждого последующего перепада давления предварительно взвешенный финишный фильтр удаляют из испытательного стенда и повторно взвешивают.

Увеличение массы испытуемого фильтра позволяет определить массу пыли удержанной им пыли. Пылезадерживающая способность A_j , для j -го цикла подачи пыли рассчитывают по формуле

$$A_j = (1 - m_j/M_j) \cdot 100 \%,$$

где m_j — масса пыли, прошедшей через фильтр (увеличение массы финишного фильтра Δm_{ff} и пыль после устройства m_d), после j -го цикла подачи пыли;

M_j — масса поданной на фильтр пыли (пылевое приращение Δm) в течение j -го цикла подачи пыли.

В процессе этих испытаний было установлено, что эффект уноса одинаково ярко выражен для фильтров групп F, M и G.

И так, мы разобрались, как определить пылезадерживающую способность воздушного фильтра на испытательном стенде. Однако, в ГОСТ не даны конкретные рекомендации, какой проскок частиц является допустимым, а какой нет.

Кроме того, мы хорошо помним предупреждение ГОСТ о том, что **полученные в соответствии с требованиями настоящего стандарта результаты не могут применяться для прогнозирования эффективности при эксплуатации и срока службы.**

У читателя возникает правомерный вопрос, а зачем тогда эти испытания, если их невозможно использовать на практике?

Тем временем на отечественный рынок поступает большое количество фильтров, перепад давления на которых в процессе эксплуатации практически не растёт. Поставщики такой продукции провозглашают это свойство своих фильтров, как новые технологии в теории и практики фильтрации воздуха. По уверению этих производителей их фильтры могут работать многие годы без замены, поскольку критерием для замены фильтров, согласно ГОСТ Р ЕН 779:2014 и его европейского аналога является соответствующий перепада давления (для фильтров грубой очистки -250 Па, для фильтров средней и тонкой очистки - 450 Па).

Нами выявлены многочисленные факты того, что фильтры этих поставщиков не относятся к новым достижениям в науке и технике, а тривиально пропускают накопленную пыль.

Какие бы не назывался в ГОСТ Р ЕН 779:2014 процесс увеличения количества и концентрации частиц в метре кубическом воздуха за фильтром, по сравнению с этими параметрами на его входе, физическая сущность его сводится к уменьшению эффективности очистки ниже нуля. Поэтому возьмем на себя смелость, назвав это явление **отрицательной эффективностью.**

4.4. Высокоэффективные системы фильтрации воздуха

Концепция применения фильтров HEPA была разработана более 30 лет назад в США. На электростанции в Фрипорте (Техас) была построена экспериментальная установка, использующая высокоэффективные системы фильтрации очистки воздуха [11]. В основу программа испытаний была положена идея о том, что потеря мощности ГТУ происходила из-за низкой эффективности стандартных систем фильтрации того времени. При этом предполагалось, что значительная часть этих потерь могла быть устранена путем применения более эффективной системы фильтрации. Опыт эксплуатации стандартной системы фильтрации показал, что в периоды между промывками проточной части компрессора имело место снижение мощности на 1 – 3 % в месяц, причем, после каждой промывки происходило лишь частичное восстановление мощности. Полное восстановление мощности достигалось только после механической

очистки проточной части компрессора во время регулярных работ по техническому обслуживанию во время его вскрытия.

Испытания опытной установки показали, что система фильтрации класса H11/E11 (с 95% эффективностью) может снижать загрязнение компрессора примерно в 5 раз при приемлемом перепаде давления на фильтрах.

После успешных испытаний высокоэффективной системы фильтрации была предпринята полномасштабная программа, во время которой, на электростанции были расположены 14 ГТУ, включая установки номинальной мощностью 100 МВт.

В процессе двухлетних испытаний новая система фильтрации продемонстрировала незначительные требования к обслуживанию, низкий уровень выбросов NO_x ГТУ, а также более высокую эффективность и надежность. Если при старой системе фильтрации воздуха наблюдалось снижение мощности ГТУ на 1-3 % ежемесячно, то при использовании высокоэффективной системы фильтрации эта величина снизилась до 0,05%. Визуальные осмотры компрессора через 1 и 2 года продемонстрировали самые чистые проточные части компрессора более чем за 20 лет эксплуатации ГТУ на данном объекте. При уменьшении количества промывок компрессора снижается термическая цикличность газовой турбины и котла-утилизатора, что положительно влияет на срок службы всей установки, а увеличение мощности ГТУ повышает эффективность ПГУ.

Уже в начале 21 века в системы фильтрации ряда энергетических ГТУ входили HEPA (EPA) фильтры. Они показывали впечатляющие результаты в Японии, Великобритании, Голландии, Канаде, Японии, Сингапуре, Филиппинах, Бангладеш и США. Одним из примеров применения таких систем фильтрации являлась ГТУ 701D (Mitsubishi) на металлургическом предприятии в городе Хугевенс (Голландия). Эта система была оснащена: фильтром предварительной очистки G4, фильтром второй ступени E10 и финишным фильтром тонкой очистки H12/E12. Срок службы ФТО составил 3 года, фильтра H10/E10 – один год при площади фильтрующего материала 18 м^2 и два года при 31 м^2 . Срок службы фильтра G4 зависел от преобладающих погодных условий.

Другой пример использования HEPA/EPA фильтров – это теплоэлектростанция Saltend в Великобритании, которая эксплуатируется с 1999 года. ТЭЦ расположена на территории химического производства, принадлежавшего компании British Petroleum [12]. В ее состав входят три энергоблока с ПГУ по 400 МВт, каждый из которых оснащен ГТУ 701F3 (Mitsubishi), мощностью 270,3 МВт. Особый интерес представляет окружающая среда, в которой работают ГТУ. К востоку от ТЭЦ располагается химическое производство компании British Petroleum, которое производит уксусную кислоту. На юге, находится

устье реки, морской канал, соединенный с Северным морем. На севере – расположен завод, производящий шлифовальные круги. Известно, что именно частички абразивных материалов, являются основным источником эрозии лопаток ГТУ. И, наконец, на западе ТЭЦ расположена крупная частная компания, имеющая большие угольные склады. Местечко Saltend в восточной части города Хала, испытывает сильное негативное влияние сырости и тумана в зимний период времени. Безусловно, такие погодные условия значительно усложняют и так не простую окружающую среду, в которой эксплуатируется система фильтрации ГТУ.

КВОУ компании Pneumafil (США) для ГТУ расположены на уровне земли (Рис 4.6) [13].



Рис.4.6. Расположение КВОУ ГТУ на электростанции Saltend (Великобритания)

Такое решение обусловлено тем, что угольные частички пыли с близко расположенных складов под воздействием ветра поднимаются высоко вверх и могут представлять серьезную опасность для фильтров. Для защиты ГТУ от атмосферных и промышленных загрязнений система фильтрации имеет три ступени очистки воздуха: предфильтра, промежуточного фильтра и ФТО. КВОУ оснащено 640 фильтрующими элементами каждого типа. В зимний период времени фильтры защищены от обмерзания антиобледенительной системой (АОС), которая начинает работать при температуре менее $+5^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности выше 70%. Горячий воздух для подогрева атмосферного воздуха по трубопроводам АОС подается от компрессора ГТУ.

В системе фильтрации использовались предфильтры класса очистки G4, промежуточных фильтров класса очистки F9 и фильтров тонкой очистки класса очистки H12/E12.

Несмотря на тяжелые условия эксплуатации ГТУ, обусловленные наличием большого количества источников загрязнения в окружающей среде, срок службы НЕРА/ЕРА фильтров достигает 2 года, а промывка компрессоров вообще не требуется. На рис.4.7а изображено состояние компрессорных лопаток ГТУ 701F3 на электростанции Saltend через 4 года эксплуатации при использовании фильтров H12/E12. Для сравнения, на рис.4.7б показано состояние компрессорных лопаток ГТУ V94.2 на ТЭЦ, расположенной в Санкт-Петербурге, через 6 месяцев эксплуатации и ежемесячных промывках проточной части при использовании финишного ФТО класса очистки F7[13].



а

б

Рис.4.7. Состояние лопаток компрессора ГТУ при финишном фильтре: а- E12; б- F7

Это сравнение представляет особый интерес, поскольку климатические условия на обоих энергетических объектах схожие (Лондон и Санкт-Петербург находятся на одной географической широте). Визуальный осмотр состояния лопаток компрессоров показывает полное отсутствие загрязнения на облопачивании ГТУ 701F3, работающей при одинаковых климатических условиях, но в более тяжелых условиях окружающей среды, чем ГТУ V94.2. На компрессорных лопатках V94.2 видны значительные отложения несгоревших углеводородов. При этом следует отметить, что замена ФТО класса очистки F7 производится ежегодно, а H12/E12 – раз в два года.

В табл. 4.2 представлены сводные данные ежегодных затрат на эксплуатацию ГТУ V94.2А для различных систем фильтрации воздуха [14].

Табл.4.2. Сводная таблица ежегодных затрат на примере V94.2А

Тип фильтра и материала	перепад давления			загрязнение		Стоимость замены фильтра, €	Затраты на потерю мощности в связи с промывкой компрессора, €	Общая ежегодная эксплуатационная стоимость, €
	Затраты на потерю мощности, €	Затраты на дополнительное топливо, €	Затраты на дополнительное топливо в результате повышения тепловой мощности, €	Затраты на потерю мощности, €	Затраты на дополнительное топливо в результате повышения тепловой мощности, €			
Целлюлозный импульсный	768 489	530,298	194,443	4,965,5 01	1,936,693	96,000	684,000	9,175,524
Синтетическое G4+F8	575 856	397,371	132,457	4,954,7 68	1,709,525	72,000	684,000	8,464,177
Наилучший доступный импульсный	768,48 9	530,298	194,443	3,084,0 39	1,202,867	144,00 0	684,000	6,608,136
Стекловолоконные G4+F8	575,85 6	397,371	132,457	2,658,7 79	917,348	57,600	684,000	5,423,411
Стекловолоконные G4+F9	575,85 6	397,371	132,457	1,184,5 61	408,705	63,000	684,000	3,833,496
G4+F8+ H10 HEPA	575,85 6	397,371	132,457	222,80 7	76,874	126,90 0	0	1,532,265
G4+F8+ H12 HEPA	575,85 6	397,371	132,457	1,724	595	132,30 0	0	1,240,303
G4+F8+ H14 HEPA	575,85 6	397,371	132,457	30	10	140,40 0	0	1,246,124

Из табл.4.2 видно, что последовательные затраты на дополнительное топливо, возникающие в результате работы фильтрующей системы, во много раз превосходят годовую стоимость фильтров. За срок службы ГТУ они могут достичь огромных сумм. Таким образом, сэкономив несколько сотен евро на замене фильтров, можно потратить миллионы на закупку дополнительного топлива.

Самые низкие затраты на систему фильтрации в данном примере относятся к ступени тонкой очистки H12/E11.

Потеря выработки электроэнергии в зависимости от типа фильтрующего материала выглядит следующим образом:

- 1.Материал HEPA/EPA – приблизительно 0,005% в месяц.
- 2.Стекловолоконный материал F8 – примерно 1% в месяц при постоянной работе.
- 3.Импульсная фильтрация – приблизительно 3,3% в месяц при постоянной работе в несоответствующих климатических условиях.

Для иллюстрации этих цифр проанализируем уменьшение выработки электроэнергии на примере ТЭЦ с двумя энергоблоками ПГУ- 450, в состав каждого из которых входят две ГТУ ГТЭ-160 мощностью каждый 153,3 МВт и фильтры тонкой очистки F8.

Для 900 МВт ТЭЦ газотурбинная составляющая мощности имеет величину 613,2 МВт. С учетом 12% потерь в год от использования в системах фильтрации ФТО F8, потери мощности составят 73,6 МВт, что соизмеримо, например, с ПГУ-90. Другими словами, для компенсации уменьшения выработки электроэнергии от применения фильтров F8, необходим ввод дополнительных мощностей. При использовании НЕРА фильтров для тех условий, потери мощности составят всего 0,37 МВт в год.

Для современного поколения ГТУ с удельной мощностью \tilde{N} (отношение мощности к расходу газа) более 300 кВт/кг следует применять фильтрующую систему H13 и H14. Это обусловлено тем, что с увеличением удельной мощности ГТУ повышается их чувствительность к загрязнению компрессоров. Например, уменьшение расхода воздуха на 1 кг/с, вызванное загрязнением компрессора, снижает мощность ГТУ первого поколения ($\tilde{N}= 100-150$ кВт/кг) на 100 кВт, а современных ГТУ – на 450 кВт [15]. Кроме того, лопатки газовых турбин ГТУ с удельной мощностью более 100 кВт/кг обычно имеют отверстия для охлаждения, которые засоряются посторонними включениями из охлаждающего воздуха.

Согласно рекомендациям [15] для ГТУ с $\tilde{N}= 100-150$ кВт/кг достаточно грубой системы фильтрации воздуха уровня G4-F5, для $\tilde{N}= 150-300$ кВт/кг – следует использовать ФТО класса F8. Для ГТУ с более высоким уровнем удельной мощности необходимо устанавливать НЕРА фильтры с эффективностью 99,95% при размере частиц пыли 0,15-0,3 мкм.

Значения удельных мощностей ГТУ, используемых в составе ПГУ отечественных ТЭЦ в первом десятилетии 21 века, лежала в диапазоне 302,2 до 308,5 кВт/кг. Класс очистки финальных фильтров КВОУ имел значения F7-F8. Удельная мощность ГТУ 701F3 (Mitsubishi) на электростанции Saltend составляет 415,2 кВт/кг, ФТО - H12/E12. Согласно табл.4.2, даже применение ФТО с классом очистки F9, вместо F8, позволил бы персоналу отечественных ТЭЦ снизить затраты на эксплуатацию ГТУ на 41,5%.

Капитальные затраты на установку систем фильтрации ГТУ на базе различных фильтров:

- стекловолоконные фильтры с мини складками G4 + F8 € 250 000
- синтетические фильтры G4 + F8 € 250 000
- импульсные фильтры € 400 000
- система фильтров G4 + F8 + H14 НЕРА..... € 500 000

Из данного сравнения видно, что капитальные затраты для систем фильтрации НЕРА в 2 раза выше, чем для обычных систем. Однако, данные затраты окупаются уже в течение 6 месяцев эксплуатации.

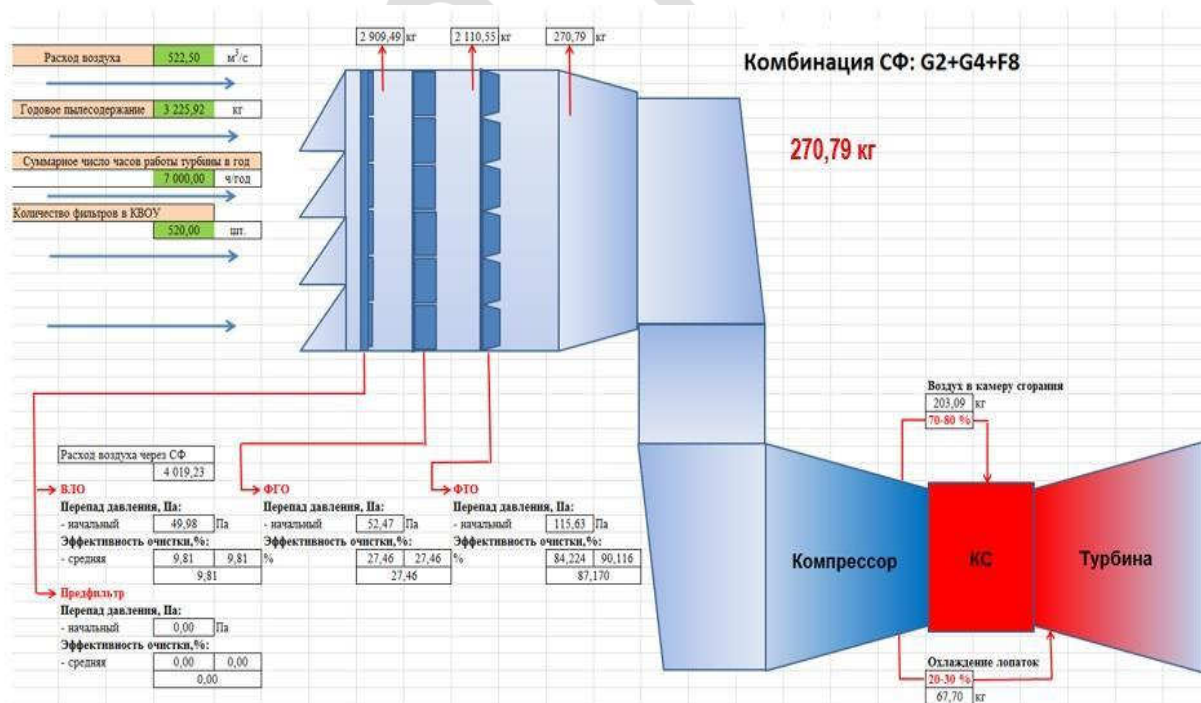
На рис.4.9, на примере ГТУ GT26B Alstom (GE), представлены расчеты количества пыли, проникающей в компрессор турбомашины при базовой (G2+G4+F8) и новой (G4+F7+E10) системах фильтрации атмосферного воздуха в КВОУ. В качестве исходных данных расчета, взяты результаты замеров запыленности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ(Рис.4.8).

m ³	Size	Δ #/m ³	Σ #/m ³
	0.3	57835690	61908130
	0.5	3609188	4072438
	1.0	415194	463251
	3.0	26855	48057
	5.0	18021	21201
	10.0	3180	3180

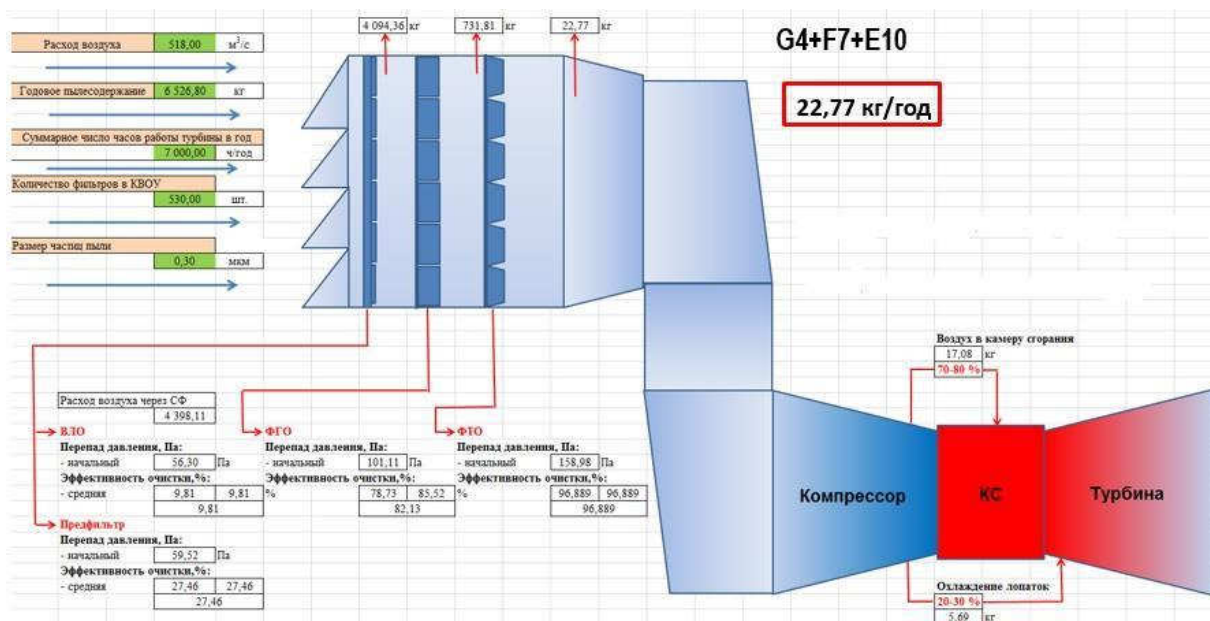
Z:021 Date: 8/11/2015
 L:location 1 Time: 08:49:16
 Sample: 00:01:00 Vol: 2.83L Alarm: No
 Flow: OK Inst: OK

Record: 77 Records: 82 / 10000

Рис.4.8. Результаты замера запыленности атмосферного на всасе КВОУ ГТУ



а



б

Рис.4.9. Расчет количества поступающей пыли в ГТУ GT26B Alstom (GE): а-при базовой системе фильтрации воздуха; б- при G4+F7+E10

Как видно из расчетов, представленных в графическом виде, количество пыли, поступающей в компрессор ГТУ при новой системе фильтрации, снизится почти в 12 раз, по сравнению с базовым вариантом.

Все наглядно и понятно. Но, тогда возникает закономерный вопрос: если западные производители фильтров знали эту информацию еще 20 лет назад, так почему они снабжали КВОУ ГТУ, поставляемые в нашу страну, с финишными фильтрами класса F7-F8?

К сожалению, следует признать, что существует конфликт интересов между поставщиками оборудования электростанций и персоналом ТЭЦ относительно системы фильтрации.

С коммерческой точки зрения поставщиков оборудования, система фильтрации КВОУ должна иметь минимальную цену. Не важно, какая она по качеству, лишь бы она была в наличии на ГТУ. Такой подход означает только одно - использование воздушных фильтров самой низкой эффективности, которые будут работать при максимально возможной скорости потока. А это ведет к нарушению основополагающего принципа работы системы фильтрации с механической средой. Работа фильтров с более высокими скоростями потока

означает повышение перепада давления и снижение их эффективности и, как следствие, повышение затрат на эксплуатацию ГТУ.

С коммерческой точки зрения персонала ГТУ, требуется самый низкий перепад давления и самая высокая эффективность работы фильтра, что прямо противоречит коммерческим представлениям поставщиков КВОУ.

С технической точки зрения персонал отечественных ГТУ в то время, не обладал необходимыми знаниями о существующих системах фильтрации. И это была не вина тружеников электроэнергетики, это были пробелы программ обучения в высших учебных заведениях (ВУЗ) инженерных специализаций. И в настоящее время в ведущих институтах и университетах, готовящих бакалавров и магистров для энергетических отраслей промышленности нашей страны, отсутствует специализация или курсы лекций, посвященных системам фильтрации воздуха.

Авторы книги надеются, что их скромный вклад в решение этой проблемы, поможет инженерному персоналу отечественных электростанций и профессорско-преподавательскому составу ВУЗ профессионально решать стоящие перед ними задачи.

4.5. Рейтинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ

Из многочисленных трактовок толковых словарей понятия “рейтинг” для наших целей подходит формулировка, приведенная на Web-site Wikipedia Foundation: “рейтинг (англ. rating) — числовой или порядковый показатель, отображающий важность или значимость определенного объекта, или явления”.

Опыт электростанции Saltend (Великобритания) по выбору места и высоты установки КВОУ ГТУ 701F3 (Mitsubishi) в сложных климатических условиях, показал важность мониторинга окружающей среды в процессе проектирования ВЗТ энергетической турбомашин.

Значимые результаты по мониторингу загрязненности воздуха на всасе КВОУ энергетических ГТУ достигнуты в Москве, где в течение нескольких лет осуществляется такая работа. На базе выполненных исследований строятся рейтинги загрязненности атмосферного воздуха на действующих ТЭЦ с ПГУ [16].

О целесообразности выполнения замеров на всех ТЭЦ в одно и тоже время.

Результаты замеров, выполненные одновременно на ТЭЦ в ЮАО, СЗАО и ЮЗАО

Москвы через равные промежутки времени, показали, что максимальные величины условных значений количества частиц в м³ атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ варьируются как внутри филиала, так от филиала к филиалу в течение рабочего дня (Табл.4.3).

Табл.4.3. Результаты замеров максимальных значений загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ (млн. частиц/м³)

ТЭЦ	09:00	13:00	17:00
ЮАО	182	74	154
СЗАО	121	171	68
ЮЗАО	30	51	48

Это обусловлено внешними и внутренними факторами, влияющими на формирование фона окружающей среды: изменение интенсивности движения транспорта по оживленным автомобильным и железнодорожным дорогам, рост выбросов собственного оборудования ТЭЦ с увеличением нагрузки и т.д. Так, источниками, формирующими фон окружающей среды перечисленных объектов являются: третье транспортное кольцо Москвы с интенсивным автомобильным движением расположенное рядом с ТЭЦ в ЮАО и недалеко от ТЭЦ в ЮЗАО; железнодорожное движение по Московской кольцевой дороге, а также башенная и вентиляторная градирни, установленные напротив КВОУ ГТУ ТЭЦ СЗАО. Временные рамки выполнения диспетчерского графика системного оператора несения электрической нагрузки блоками ПГУ, рост интенсивности движения автомобильного и железнодорожного транспорта, а также другие факторы формируют пики (экстремумы) фоновых значений загрязненности атмосферного воздуха. Исходя из этого, для корректного составления рейтинга загрязненности воздуха на всасе КВОУ ГТУ, целесообразно замеры на всех ТЭЦ выполнять в определенный промежуток времени.

Как показывает практика, в обычных климатических условиях нет прямо пропорциональной зависимости между уровнем загрязненности атмосферного воздуха и расстоянием между ТЭЦ. Так дистанция между ТЭЦ в ЮАО и ТЭЦ в ЮЗАО по прямой составляет всего 5 км, а между ТЭЦ в ЮАО и ТЭЦ в СЗАО - 13 км. При этом, уровень загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ в ЮАО в утренние и вечерние часы превышает этот параметр на ТЭЦ в ЮЗАО в несколько раз (см. табл. 4.3.).

В экстремальных условиях, например, лесных и торфяных пожаров, как это было летом 2010 года в г. Москве и Московской области, фон загрязненности атмосферного воздуха формируется общим, превалирующим над местными источниками, фактором задымления с высоким содержанием частиц в м³ атмосферного воздуха (Глава 2).

Общим для трех перечисленных ТЭЦ является то, что их КВОУ ГТУ имеют трехсторонний всас и трех ярусную конструкцию. Интересным представляется распределение максимального суммарного количества частиц в м³ атмосферного воздуха по всасам и ярусам КВОУ в различные временные интервалы дня.

Для примера, на рис.4.10 в относительном виде приведены результаты замеров, выполненные на КВОУ ТЭЦ в СЗАО 26.10.2018.

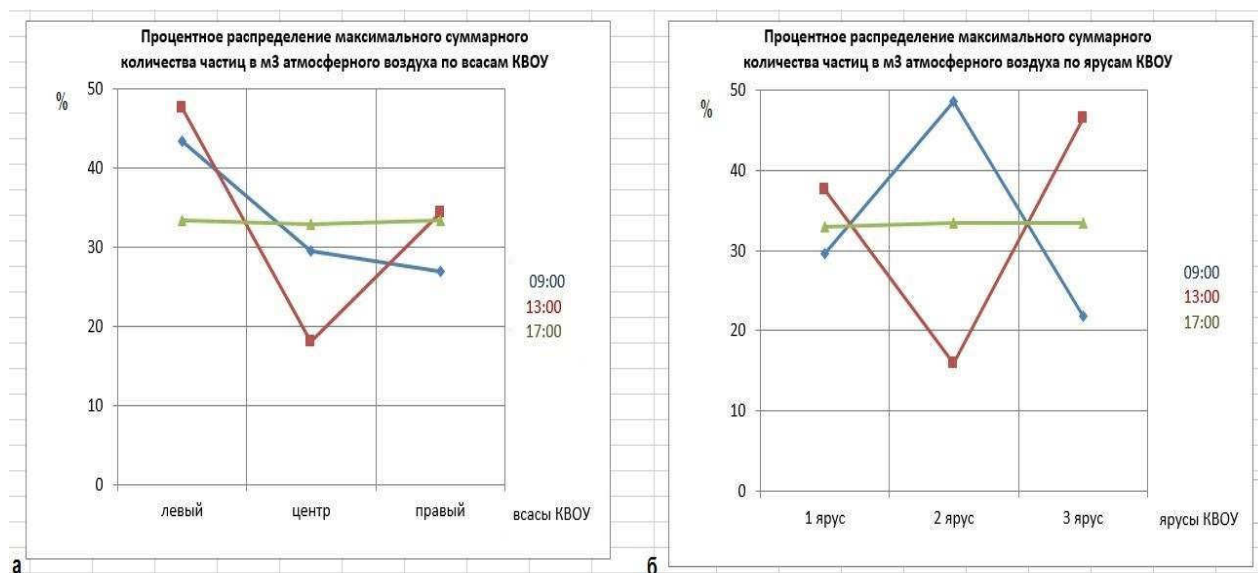


Рис.4.10. Процентное распределение максимального количества частиц в кубическом метре атмосферного воздуха на ТЭЦ в СЗАО: а- на всасе; б- по ярусам КВОУ

Замеры выполнялись через равные промежутки времени равные четырем часа. Приведенные графические зависимости показывают, что в течение рабочего дня картина распределения максимальных значений загрязнений на всасе и по ярусам КВОУ существенно меняется. Если в утренние и дневные часы работы оборудования ТЭЦ с высокой электрической нагрузкой, а также интенсивным транспортным движением (с повышенным выбросом выхлопных газов в атмосферу) на рядом прилегающей автомобильной и железнодорожной трассе, значения загрязненности воздуха велики, то в конце рабочего дня (снижения интенсивности перечисленных факторов) уровень загрязненности снижается. Происходит выравнивание (равномерное распределение) максимального суммарного количества частиц в м³ атмосферного воздуха, как по всасам, так и по ярусам КВОУ.

В утреннее и дневное время наибольшее загрязнение воздуха отмечалось на левом всасе КВОУ, со стороны которого расположены оживленная автомобильная дорога и башенная градирня (Рис.4.10а).

В процессе мониторинга окружающей среды в 13:00 были зафиксированы ярко выраженные минимальные экстремумы на центральном всасе и втором ярусе КВОУ, которые свидетельствуют, что воздушные фильтры, установленные в этом месте, менее подвержены негативному воздействию загрязняющих веществ, чем в другие промежутки времени (см. рис.4.10а и 4.10б). Наибольшему воздействию загрязняющих веществ в этом временной интервал подвергаются воздушные фильтры, установленные на левом всасе третьего яруса КВОУ.

В утренние часы, наоборот, зафиксирован рост загрязняющих веществ на левом всасе второго яруса КВОУ (максимальный экстремум на рис.4.10б). Таким образом, в этот промежуток времени происходит трансформация направлений течения воздушных потоков, приносящих максимальное количество частиц в м³ атмосферного воздуха

Методика определения рейтинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ.

На каждой ТЭЦ ежедневно в определенное время осуществляется мониторинг загрязненности атмосферного воздуха на всех всасах и ярусах воздухозаборного тракта ГТУ. Для этой цели на все ТЭЦ с ГТУ закуплены и поставлены одинаковые счетчики частиц. Наличие одинаковых приборов (одного класса) является важным фактором, обуславливающим одинаковую точность измерений. Благодаря этому, возможен корректный сравнительный анализ результатов измерений, выполненных на всех филиалах общества.

Из специалистов ТЭЦ с ПГУ сформирована и подготовлена группа, осуществляющая мониторинг загрязненности атмосферного воздуха на всасах КВОУ ГТУ. Результаты замеров фиксируются и заносятся в специально разработанные таблицы мониторинга загрязненности атмосферного воздуха КВОУ ГТУ. По результатам измерений определяется максимальное суммарное количество частиц в м³ атмосферного воздуха. Ежедневно результаты мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ со всех ТЭЦ поступают эксперту для анализа фона окружающей среды и принятия необходимых мер в случае экстремальных ситуаций.

По мере сбора статистики на каждом филиале с ГТУ строятся графики ежемесячного изменения загрязненности атмосферного воздуха на всасах КВОУ. Фиксируются максимальные суммарные значения количества частиц в м³ атмосферного воздуха на всех всасах и ярусах КВОУ. Определяется наибольшее значение из всех измеренных величин,

которое используется при построении графика.

Аналогичным образом, исходя из поставленной цели, могут строиться графики изменения загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными частицами.

Целью выполненных исследований является определение максимального количества частиц в м³ атмосферного воздуха на всасах КВОУ ГТУ для построения рейтинга загрязненности всех ТЭЦ с ГТУ в Москве. Кроме того, данная информация может быть использована для расчета количества пыли, поступающей в проточную часть ГТУ при различных системах фильтрации КВОУ и оценки (прогнозирования) жизненного цикла установленных или планируемых к установке воздушных фильтров (см.рис.4.9).

На Рис.4.11, для примера, представлены результаты мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ СЗАО за октябрь 2018 года. Как видно из представленной зависимости, изменение загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ сопровождается и минимальными, и максимальными экстремумами. Вид зависимости, как отмечалось ранее, формируется под воздействием, как локальных, так и атмосферных факторов. Например, всплеск загрязненности воздуха в середине октября месяца обусловлен ростом температуры окружающей среды до значений плюс 16 °С-18 °С и, как следствие, увеличением количества частиц пыли в атмосферном воздухе.

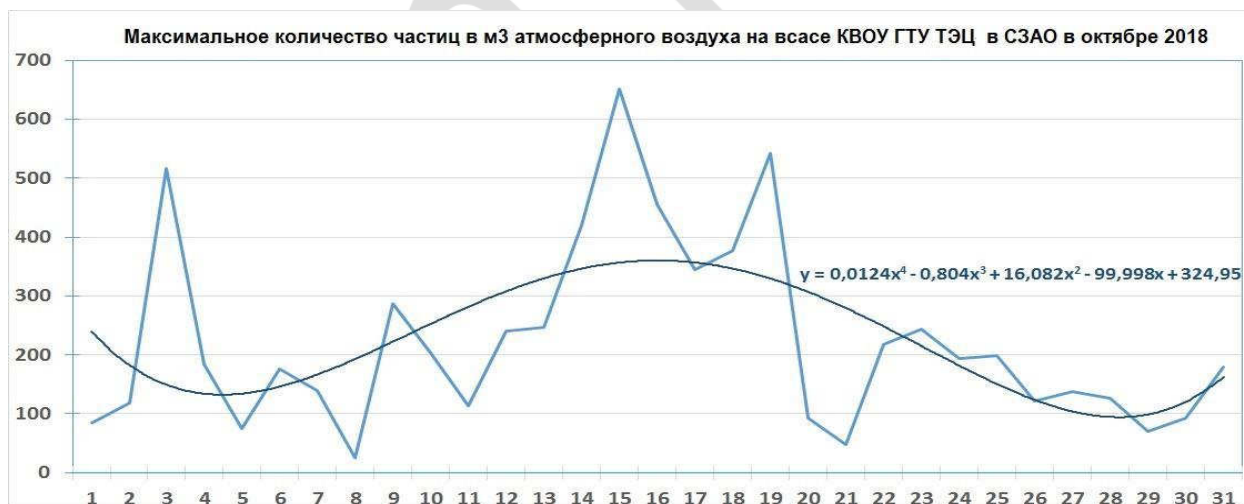


Рис.4.11. Максимальное количество частиц в кубическом метре атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ в СЗАО в октябре 2018 г

Методом аппроксимации результатов мониторинга строятся ежемесячные тренды изменения загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ всех ТЭЦ.

Получают математические формулы, описывающие изменение трендов, которые могут быть использованы при прогнозировании ежемесячного фона загрязненности

атмосферного воздуха и расчета срока службы воздушных фильтров КВОУ (см. рис.4.11).

На основании ежедневно представляемых филиалами данных создается единая для всех ТЭЦ таблица максимальных значений количества частиц в м³ атмосферного воздуха на всасах КВОУ ГТУ на текущий месяц.

В табл.4.4 представлены результаты замеров, выполненные на ТЭЦ с ГТУ в течение октября 2018 г.

Табл.4.4. Замеры загрязненности воздуха на ТЭЦ с ГТУ в Москве в октябре 2018

ТЭЦ	неделя 40					E	неделя 41					E	неделя 42					E	неделя 43					E	неделя 44			E	Месяц	
	1	2	3	4	5		8	9	10	11	12		15	16	17	18	19		22	23	24	25	26		29	30	31		EE	M
ЮАО	116	262	560	88	60	1	77	157	116	102	141	2	473	164	264	279	483	3	137	269	893	168	182	1	120	99	203	1	8	2
	2	1	1	4	1	9	1	2	2	2	2	9	3	6	2	7	3	21	4	1	1	2	1	9	1	1	1	3	51	
ЗАО	58	175	41	60	52	5	8	80	95	27	115	5	521	331	259	526	492	2	180	103	123	36	103	5	23	76	152	5	22	4
	5	2	7	6	2	22	7	5	5	6	4	27	2	2	3	1	2	10	2	7	5	7	3	24	7	4	4	15	98	
СЗАО	85	118	517	184	47	2	25	287	204	113	241	1	652	453	345	338	542	1	218	244	194	198	121	2	70	92	152	2	8	1
	3	4	3	1	3	14	3	1	1	1	1	7	1	1	1	5	1	9	1	2	4	1	2	10	2	2	3	7	47	
ЮЗАО	77	105	559	59	29	6	24	50	66	26	95	7	210	187	246	362	428	7	102	148	507	73	30	4	47	56	66	6	30	7
	6	5	2	7	7	27	4	7	7	7	6	31	6	7	5	4	4	26	6	6	2	3	7	24	3	5	7	15	123	
САО	76	90	233	117	30	7	23	98	107	34	116	4	321	211	227	388	138	6	178	182	85	39	36	6	24	43	67	7	30	6
	7	7	5	2	6	27	5	3	4	5	3	20	5	5	6	3	7	26	3	4	6	6	6	25	6	7	6	19	117	
ЮАО	66	137	208	109	39	3	66	82	108	62	105	3	203	254	44	405	422	4	96	198	245	49	82	3	38	82	153	3	16	3
	4	3	6	3	4	20	2	4	3	3	5	17	7	3	7	2	5	24	7	3	3	4	4	21	4	3	3	7	89	
МО	165	103	374	72	31	4	23	75	83	38	67	6	368	220	257	314	416	5	109	154	45	42	63	7	31	45	185	4	26	5
	1	6	4	5	5	21	6	6	6	4	7	29	4	4	4	6	6	24	5	5	7	5	5	27	5	6	2	13	114	

По горизонтали приведены результаты замеров, выполненные на каждой ТЭЦ ежедневно в течение недели (черный цвет). По вертикале, голубым цветом, указаны ежедневные места каждой ТЭЦ в рейтинге загрязненности воздуха на всасе КВОУ. Место каждой ТЭЦ определяется путем сравнения результатов замеров, выполненных на других филиалах в тот же самый день недели. Чем большее количество частиц зафиксировано в м³ атмосферного воздуха, тем выше место занимает данный филиал в рейтинге. В графе E по горизонтали голубым цветом указывается сумма мест, занятых ТЭЦ в течение недели. На основании этих данных определяется место ТЭЦ, занятое в рейтинге за неделю (выделено красным цветом): тем меньше сумма мест, тем более высокое положение (более загрязнен атмосферный воздух на всасе КВОУ) занимает филиал.

Если в течение недели несколько ТЭЦ набирают одинаковую сумму мест (например, ТЭЦ в ЮЗАО и ТЭЦ в ЗАО на 40 и 42 неделе), то более высокое место занимает филиал, у которого в этот промежуток времени было зафиксировано большее количество дней с наиболее высокими значениями количества частиц в м³ атмосферного воздуха. В случае 40 –й недели - это ТЭЦ в ЮЗАО, а на 42 неделе – САО.

Аналогичным образом обрабатываются результаты мониторинга загрязненности воздуха в течение всего месяца. В заключении в графу ЕЕ (столбец “Месяц”) заносится сумма мест, полученных ТЭЦ в течение каждого дня (недели) мониторинга. По результатам этих данных определяется электростанция с наиболее загрязненным атмосферным воздухом на всасе КВОУ ГТУ. В случае равенства величины суммы ежемесячных мест, как например у ТЭЦ в ЮАО и ТЭЦ СЗАО, критерием, определяющим филиал с наиболее загрязненным воздухом, является сумма ежедневных мест. У ТЭЦ в СЗАО эта величина равна 47, а у ТЭЦ в ЮАО - 51. Следовательно, ТЭЦ в СЗАО занимает первое место в рейтинге загрязненности воздуха на всасе КВОУ среди ТЭЦ с ГТУ за октябрь 2018 года.

Такой же подход используется при обработке результатов мониторинга на всех ТЭЦ с ГТУ при определении годового рейтинга загрязненности атмосферного воздуха на всасах их КВОУ.

Сбор данных в формате предложенной Табл.4.4 позволяет не только вести статистику результатов мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ и определять рейтинг загрязненности ТЭЦ, но и осуществлять сравнительный анализ изменения фоновых значений загрязненности атмосферного воздуха в течении дня, недели и месяца. Например, на 42 неделе отмечен резкий рост значений количества частиц в м³ атмосферного воздуха на всех филиалах с ПГУ. Как отмечалось ранее, на примере ТЭЦ в СЗАО, это явление было обусловлено аномальным повышением температуры атмосферного воздуха для середины октября 2018 г.

По мере роста массива информации ТЭЦ с ГТУ появляется возможность прогнозирования уровня загрязнения атмосферного воздуха по временам года, оценки жизненного цикла установленных воздушных фильтров КВОУ и разработка рекомендаций по изменению систем фильтрации циклового воздуха ГТУ.

Резюме:

1. Мониторинг атмосферного воздуха на всасе КВОУ является единственно верным источником информации о реальном состоянии окружающей среды.
2. Для корректного составления рейтинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ энергетической компании необходимо проводить в одинаковый промежуток времени.
3. Сбор и анализ ежедневных, недельных, месячных результатов мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на всасах КВОУ ГТУ позволяет оперативно

реагировать на изменения окружающей среды и принимать своевременные решения.

4. Результаты многолетнего мониторинга дают возможность прогнозировать уровни загрязнения атмосферного воздуха по временам года, осуществлять оценку жизненного цикла, установленных воздушных фильтров КВОУ и разрабатывать рекомендации по изменению систем фильтрации циклового воздуха ГТУ.
5. Результаты рейтинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ позволяют оптимизировать финансовые затраты на закупку и создания оптимального неприкосновенного запаса воздушных фильтров, тем самым снижая нагрузку на складские помещения энергетических компаний.

4.6. Модернизация КВОУ энергетических ГТУ с целью качественного мониторинга загрязненности воздушных фильтров по перепадам давления

Во второй главе книги мы подробно рассмотрели большинство природных и рукотворных источников загрязнения окружающей среды, влияющих на работу энергетических ГТУ. Из параграфа 2.2.2 стало известно, как влияет конструктивное исполнение ВЗТ ГТУ на распределение скоростей потока атмосферного воздуха на всасе КВОУ. Вы убедились, к каким последствиям может привести выпадение из ячейки КВОУ только одного фильтра (Рис.2.60), при существующей системе мониторинга системы фильтрации воздуха. Мы пришли к выводу, что **неоптимальная система мониторинга перепада давления на фильтрах в системе очистки воздуха является еще одним конструктивным недостатком современных КВОУ энергетических ГТУ.**

В настоящее время замена воздушных фильтров на отечественных КВОУ ГТУ осуществляется по величине перепада давления согласно ГОСТ Р ЕН 779:2014. Для фильтров грубой очистки класса G эта величина составляет 250 Па, для фильтров средней и тонкой очистки – 450 Па. Мониторинг перепада давления на воздушных фильтрах обычно осуществляется штатным датчиком, установленным на одном из ярусов КВОУ, для каждой ступени фильтрации воздуха. Таким образом, для трехступенчатой системы фильтрации циклового воздуха ГТУ используется три датчика давления (по одному на каждую ступень фильтрации).

На рис.4.12 представлен мнемокадр показания датчиков перепада давления на КВОУ с односторонним всасом атмосферного воздуха энергетической ГТЭ-160 [17].

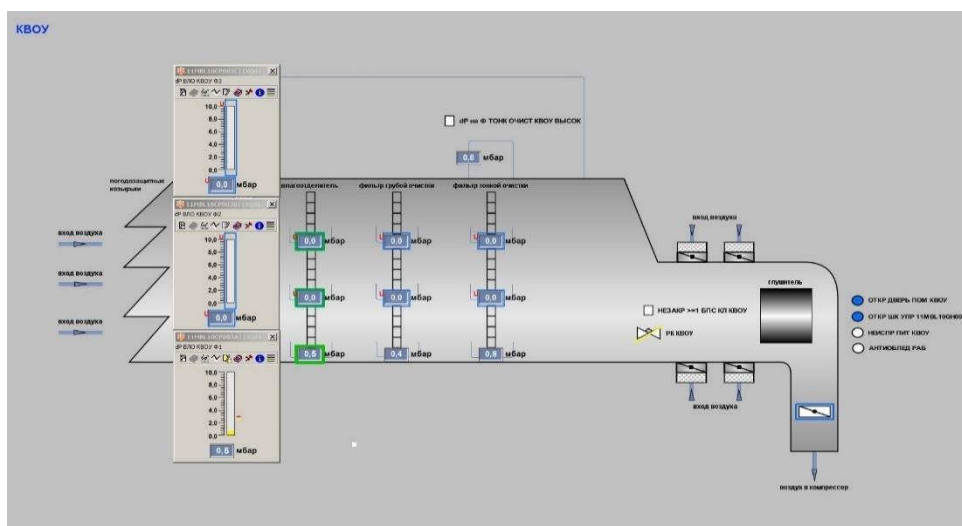


Рис.4.12. Мнемокадр показаний датчиков давления на первом ярусе КВОУ ГТЭ-160

Как видно из мнемокадра замер показаний датчиков давления на фильтрах осуществляется только на одном (нижнем) из трех ярусов КВОУ.

КВОУ энергетических ГТУ обычно имеют, как односторонний всас атмосферного воздуха, так и трехсторонний. Количество ярусов КВОУ ГТУ (по высоте) варьируется в диапазоне от 3 до 4. В зависимости от мощности энергетической ГТУ на каждой ступени фильтрации КВОУ устанавливается 390 - 480 фильтров (для ГТЭ-160) соответственно, для ГТУ Siemens 5- 4000F- 540 фильтров.

Из приведенных в глава 2 примеров становится очевидно, что использование только штатных датчиков давления, поставляемых вместе с КВОУ, недостаточно для осуществления качественного мониторинга загрязненности фильтров по перепаду давления. В этом случае замена всех фильтров одной ступени очистки воздуха на всех всасах и ярусах осуществляется по показаниям всего одного датчика давления, установленного на одном из ярусов КВОУ.

Таким образом, происходит необоснованная замена воздушных фильтров, приводящая к сокращению их жизненного цикла и росту финансовых затрат на закупку новых комплектов фильтров КВОУ ГТУ. Для больших энергетических компаний с несколькими КВОУ ГТУ, оснащенных более 10 000 воздушных фильтров, финансовые потери на закупку такого количества фильтр - элементов могут быть значительными.

Для обеспечения качественного мониторинга загрязненности воздушных фильтров, с целью определения фактического перепада давления на фильтр- элементах на местах их установки в воздухозаборном тракте ГТУ в Москве, было принято техническое решение об оснащении КВОУ дополнительными датчиками перепада давления на всех его ярусах и

всасах. В результате получения фактических значений перепадов давления на воздушных фильтрах КВОУ ГТУ замена может осуществляться только тех фильтр элементах, на которых достигнуто предельно- допустимое значение перепада давления согласно ГОСТ. Это позволит сократить время на останов ГТУ и снизить трудозатраты на замену фильтров КВОУ, а также сократить финансовые затраты на закупку новых фильтр-элементов.

Для осуществления этого проекта были изготовлены два бокса (короба) из нержавеющей стали для размещения в них фильтров второй и третьей ступеней (средней и тонкой очистки) КВОУ, а также соответствующих датчиков давления (Рис.4.13). Боксы были установлены на втором (среднем) и третьем (верхнем) ярусах КВОУ.



Рис. 4.13. Бокс для установки фильтров средней и тонкой очистки воздуха и также датчиков давления

Для датчиков давления была выполнена трассировка импульсных линий и кабельных трасс. На площадке обслуживания верхнего яруса КВОУ был размещен шкаф для установки датчиков давления. Мнемокадр показаний штатных и вновь установленных датчиков давления в КВОУ ГТУ показан на Рис. 4.14.

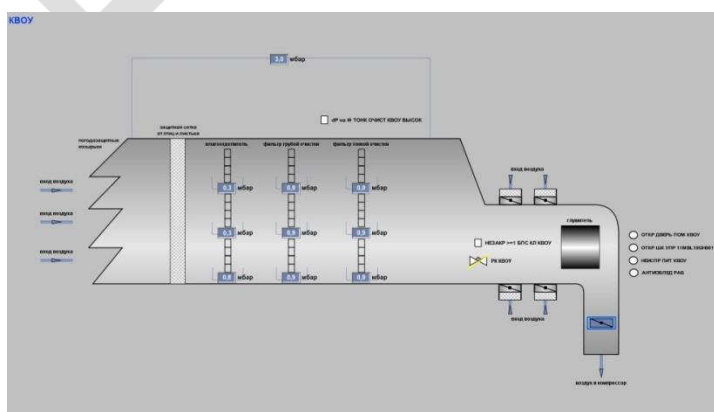


Рис. 4.14. Мнемокадр показаний датчиков давления на всех ярусах КВОУ ГТЭ-160

По плану реконструкции ВЗТ ГТЭ-160 охладительной установки циклового воздуха испарительного типа 26.05.2020 были сняты погодные козырьки КВОУ. Накануне даты снятия погодных козырьков с КВОУ были выполнены замеры загрязненности воздуха на всасе ВЗТ ГТУ.

Распределение частиц по высоте КВОУ представлено на Рис.4.15. Как видно из этих зависимостей, наибольшее количество частиц пыли было зафиксировано на втором (среднем) ярусе КВОУ. Многолетний мониторинг загрязненности атмосферного воздуха, проводимый на всасе КВОУ, показал постоянство картины распределения частиц пыли перед воздухозаборным устройством ГТУ.

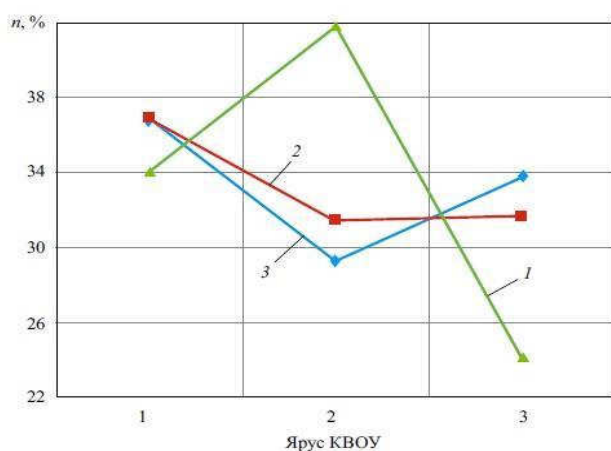


Рис.4.15. Распределение взвешенных частиц в атмосферном воздухе по ярусам КВОУ:

1-25.05.2020; 2- 29.05.2020; 3- 28.05.2020

После снятия погодных козырьков и выполнения сопутствующих этому работ продолжился постоянный поярусный мониторинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ. На рис.4.15 представлены результаты анализа замеров загрязненности воздуха за 28.05.2020. Как видно из приведенной зависимости относительного количества пыли от высоты замера, наибольшей запыленности воздуха подвержены фильтры первого (нижнего) яруса, а наименьшей загрязненности – фильтры второго (среднего) яруса КВОУ. Другими словами, картина распределения пылевой нагрузки на фильтры по высоте КВОУ поменялась на противоположную.

Следует отметить, что май 2020 г. в Москве стал рекордно дождливым за всю историю метеонаблюдений, хотя согласно многолетним статистическим данным Гидрометцентра наиболее дождливым месяцем в столице является июль. Суммарное количество осадков в мае (свыше 155 мм) втрое превысило климатическую норму (51 мм) и побило рекорд, установленный в 1933 г. (132 мм). 29 мая выпало рекордное за 140 лет

количество осадков для этого дня – 37.3 мм [18]. «По предварительным расчетам, за неполные трое суток с 29 по 31 мая в Москве выпало порядка 185% месячной нормы осадков, которая в мае насчитывает 51 мм», сообщил представитель метеослужбы.

На рис.4.15 приведено распределение количества частиц в м³ атмосферного воздуха по ярусам КВОУ за 29.05.2020 г. Как и в предыдущий, день тенденция распределения относительного количества частиц по высоте КВОУ не изменилась, хотя в абсолютном значении 29.05.2020 было зафиксировано 6-кратное увеличение количества аэрозолей. Обращает на себя внимание факт полного совпадения относительных показателей загрязненности воздуха на первом ярусе КВОУ в различных климатических условиях 28 и 29 мая 2020 г. Результаты мониторинга атмосферного воздуха на всасе КВОУ в последующие дни подтвердили зафиксированные тенденции, выявленные после снятия погодных козырьков.

Как же отразились такие экстремальные климатические условия на работе фильтров воздухозаборного устройства ГТУ при отсутствии погодных козырьков КВОУ?

В табл. 4.5 и 4.6. представлены перепады давления на фильтрах коагуляторов карманного типа класса G4, установленных на первой ступени фильтрации, фильтрах средней очистки карманного типа класса M5 и кассетных фильтрах тонкой очистки класса F9, размещенных соответственно на второй и третьей ступенях КВОУ. Фиксацию показаний датчиков давления на фильтрах выполняли с момента начала дождя 29 мая через каждые 5–7 ч эксплуатации ГТУ.

Табл.4.5. Перепад давления на фильтрах КВОУ во время дождя 29.05.2020

Время, ч.мин	Номер яруса КВОУ	Перепад давления, Па		
		ВО G4	ФСО M5	ФТО F9
07:00	1	81	82	70
	2	47	51	69
	3	48	49	70
12:00	1	123	103	93
	2	56	79	107
	3	62	76	108
19:00	1	116	99	98
	2	55	77	101
	3	62	69	86

Табл.4.6. Перепады давления на фильтрах КВОУ во время дождя 30.05.2020

Время, ч.мин	Номер яруса КВОУ	Перепад давления, Па		
		ВО G4	ФСО M5	ФТО F9
00:00	1	472	98	89
	2	35	73	94
	3	54	65	104
07:00	1	275	78	68
	2	42	40	69
	3	34	47	65
12:00	1	277	97	83
	2	56	89	96
	3	59	73	96
19:00	1	236	101	84
	2	64	99	98
	3	72	74	99

Как видно из представленных данных, перепад давления на фильтрах-коагуляторах в начале измерений был наибольшим на первом (нижнем) ярусе КВОУ, что полностью соответствует результатам мониторинга загрязненности фильтр-элементов, представленным на рис.4.15 за 29.05.2020. По мере продолжительности ливневых осадков перепад давления на фильтрах-коагуляторах первого яруса КВОУ через 5 ч вырос на 42 Па. Также произошел рост давления и на других фильтрах первой ступени на втором и третьем ярусах КВОУ. Помимо это наблюдался рост давления и на фильтрах средней и тонкой очистки. Этот факт можно объяснить намоканием фильтров-коагуляторов первой ступени очистки атмосферного воздуха и проникновением через них атмосферной влаги на установленные в одном боксе фильтры второй и третьей ступеней (средней и тонкой очистки). При намокании фильтровального материала эффективность по улавливаю пыли резко снижается и становится соизмеримой с эффективностью фильтра с более низким классом очистки.

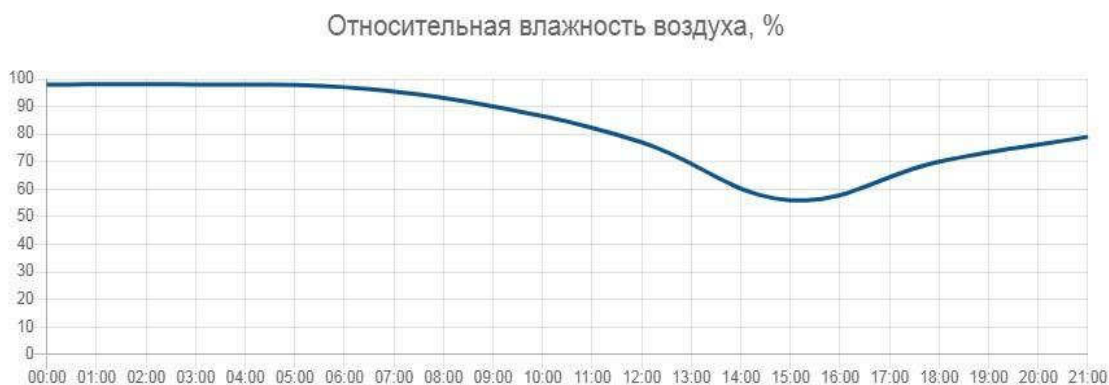
По мере роста температуры наружного воздуха с середины дня до 18:00 29.05.2020 перепад давления на всех фильтрах незначительно снизился, при этом тенденция наибольшего перепада давления на фильтрах-коагуляторах первой ступени сохранилась. Целесообразно отметить тот факт, что перепад давления на этих фильтрах на втором ярусе КВОУ незначителен, но все же ниже, чем на третьем. Это полностью согласуется с результатами мониторинга загрязненности атмосферного воздуха, приведенными на рис.4.15.

30.05.2020 характер погоды не изменился. Архив погоды в Москве так характеризует ночь этого дня: сплошная облачность без просветов, дымка, **очень сильный ливневый дождь**, облачность более 5 баллов, **ливневые осадки**, атмосферное давление ниже нормы, температура воздуха +13...+14°C, ветер северо-восточный слабый 1 м/с, **относительная влажность 97–98%**.

Несмотря на разгрузку энергоблока в ночное время, а, следовательно, уменьшение расхода воздуха через осевой компрессор ГТУ, при относительной влажности воздуха 97–98% к 00:00 ч 30.05.2020 произошел резкий скачек давления на фильтрах-коагуляторах нижнего яруса КВОУ. За 17 ч работы КВОУ с момента начала дождя 29.05.2020 перепад давления на фильтрах-коагуляторах первого (нижнего) яруса вырос на 391 Па или более чем в 5.8 раза. Это значение хорошо согласуется с зафиксированным в процессе мониторинга атмосферного воздуха 6-кратным увеличением количества аэрозолей в этот день. Для оценки последствий такого явления необходимо помнить, что увеличение перепада давления в КВОУ на 50 Па приводит в среднем к снижению выработки электроэнергии ГТУ на 0.1% [19].

Почему же перепад давления на фильтрах первой ступени очистки атмосферного воздуха так резко увеличился, а на остальных ярусах снизился? Ответ на этот вопрос можно найти в конструкции данного воздухозаборного тракта ГТУ. Первый ярус КВОУ соосен с горизонтальным воздухопроводом тракта подвода воздуха к ГТУ и, следовательно, не отраженная погодными козырьками атмосферная влага устремляется в это сечение.

На Рис.4.16 представлены тренды изменения относительной влажности RH и температуры воздуха t в течение всего дня 30.05.2020. По мере снижения относительной влажности практически в 2 раза и роста температуры наружного воздуха до +23°C к 16:00 ч воздушные фильтры на всех ярусах КВОУ постепенно начали просыхать и перепад давления на них снизился. К 19:00 ч перепад давления на фильтрах-коагуляторах первого яруса КВОУ снизился до предельно допустимых значений.



а



б

Рис.4.16. Тренды изменения параметров атмосферного воздуха 30.05.2020: а- относительной влажности; б- температуры (<http://meteoinfo.ru>)

Как отмечалось ранее, замена воздушных фильтров на КВОУ ГТУ осуществляется по перепаду давления согласно ГОСТ Р ЕН 779:2014. Для фильтров грубой очистки класса G4, в нашем случае фильтров-коагуляторов, этот перепад составляет 250 Па. Ранее датчики давления на фильтрах были установлены только на первом ярусе КВОУ. Тогда, исходя из требования этого ГОСТ, все фильтры-коагуляторы, установленные на трех ярусах КВОУ, должны были быть заменены при достижении давления 250 Па. В результате чего жизненный цикл 66.6% работоспособных фильтров-коагуляторов, установленных на втором и третьем ярусах КВОУ, был бы прерван. Энергетическая компания могла понести неоправданные финансовые потери при закупке новых фильтров коагуляторов.

Резюме:

1. Погодные козырьки КВОУ оказывают существенное влияние на защиту воздушных фильтров от атмосферной влаги. Снятие их может привести к изменению распределения количества жидких аэрозолей по ярусам КВОУ, росту перепадов давления на воздушных фильтрах и, как следствие, снижению выработки электроэнергии ГТУ.

2. Установка датчиков давления на всех ярусах и всасах воздухозаборного тракта ГТУ совместно с замерах загрязненности атмосферного воздуха позволяет осуществлять количественный мониторинг жизненного цикла воздушных фильтров КВОУ и оптимизировать финансовые затраты на их закупку.

3. Анализ показания датчиков давления на всех ярусах и всасах КВОУ во время атмосферных осадков позволяет дать оценку водостойкости установленным фильтрам.

4.7. Общие правила (здоровый смысл) при выборе оптимальной системы фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ

При оптимизации систем фильтрации циклового воздуха ГТУ энергетические компании стремятся выбрать такие фильтр элементы для КВОУ, которые позволили бы существенно уменьшить экономические затраты на перерасход топливного газа для компенсации снижения мощности энергоблока из-за загрязнения проточной части ГТУ, увеличить срок службы воздушных фильтров, отказаться от дорогостоящих On-line промывок осевого компрессора турбомашин, Off-line промывки проводить не чаще одного раза в год без снижения электрической нагрузки.

Эта задача не простая. Ее решение требует многофакторного анализа работы ГТУ и воздушных фильтров КВОУ в конкретных климатических условиях. Однако, в помощь инженерному составу энергетических компаний можно предложить несколько общих правил (здорового смысла) по выбору оптимальной системы фильтрации воздуха (Рис.4.17) [20].

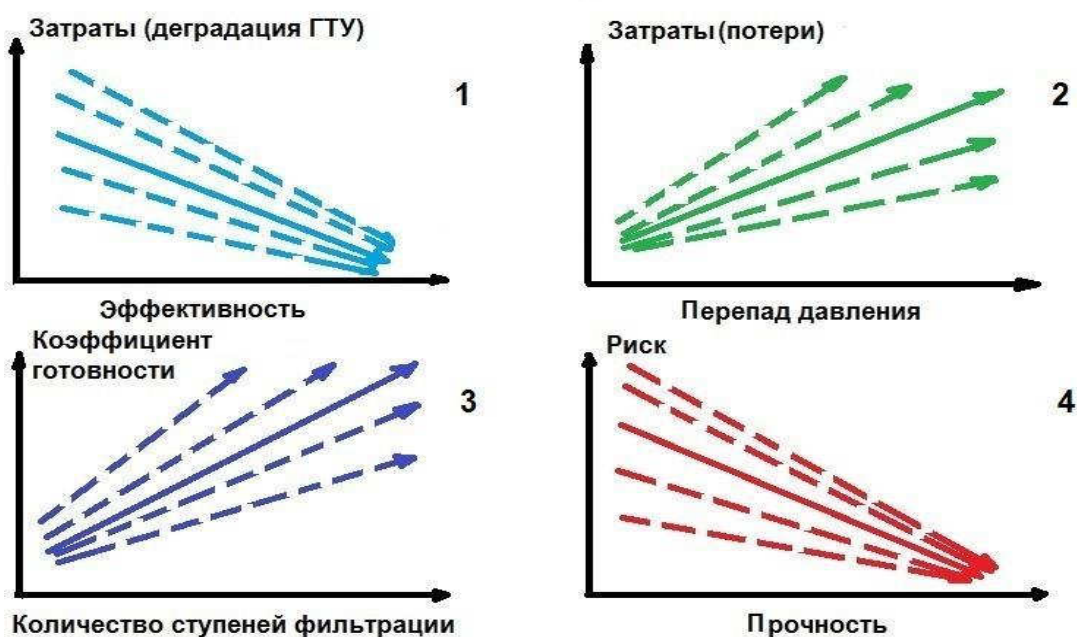


Рис.4.17. Общие правила (здорового смысла) выбора оптимальной систем фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ.

Правило № 1 - с увеличением эффективности системы фильтрации (классов очистки) снижается недовыработка электроэнергии ГТУ и экономические потери от недополученной прибыли.

Правило № 2 - с увеличением перепада давления на фильтрах экономические потери от недовыработки электроэнергии ГТУ возрастают.

Правило № 3 – с увеличением количества ступеней фильтрации готовность (коэффициент готовности) системы очистки циклового воздуха ГТУ возрастает.

Правило № 4 - с увеличением прочности (давления на разрыв) фильтров риски их разрушения и попадания в проточную часть ГТУ (повреждения облопачивания двигателя) уменьшаются.

Для подтверждения предложенных правил обратимся к мировому опыту эксплуатации и рекомендациям трех ведущих производителей ГТУ. Компания General Electric занимает 49,66% мирового рынка мощностей ГТУ (МВт), компания Siemens -26,13%, а компания Mitsubishi Hitachi Power Systems (MHPS) – 12,36%. В такой же последовательности эти компании занимают места по количеству произведенных ГТУ [21].

Для иллюстрации правила № 1 и № 2 обратимся к опыту эксплуатации ГТУ General Electric PGT 25+ в течение 10 лет. На Рис.4.18 представлена графическая зависимость суммарных затрат от класса очистки (эффективности) финишного фильтра КВОУ, обусловленных их начальным перепадом давления и загрязнением проточной части ГТУ, в сравнении с затратами на покупку фильтр - элементов.

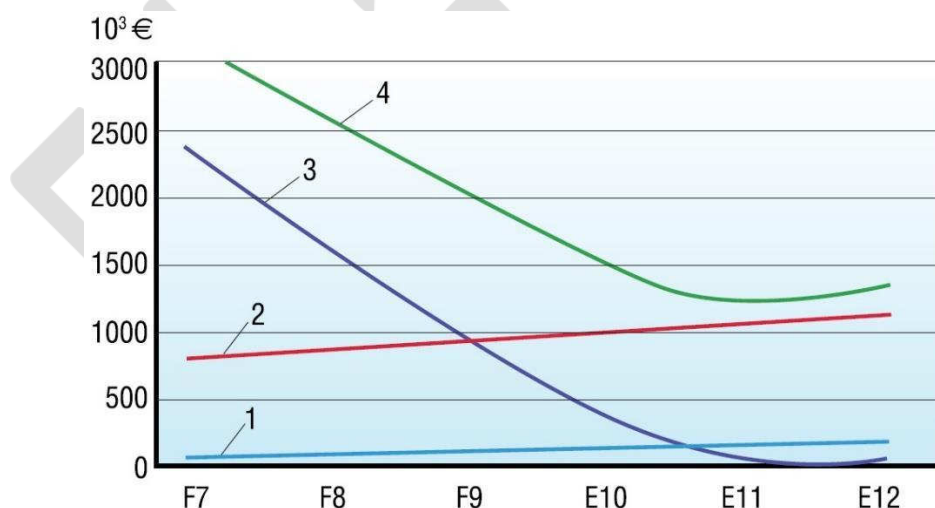


Рис.4.18. Графическая зависимость суммарных затрат от класса очистки (эффективности) финишного фильтра КВОУ.

Из представленных зависимостей следует, что при использовании фильтров тонкой (финишной) очистки классов F7-F9, затраты, обусловленные загрязнением проточной части ГТУ (линия 3), превалируют над затратами, вызванными перепадом давления в

КВОУ (линия 2). Аналогичные результаты были получены нами в процессе анализа системы фильтрации КВОУ ГТУ Siemens SGT5-4000F [22].

С увеличением эффективности очистки воздуха тенденция изменения затрат меняется: происходит резкое снижение потерь, обусловленных загрязнением проточной части ГТУ, и плавный рост затрат из-за увеличения начального перепада давления на фильтрах более высоких классов очистки. При использовании фильтров тонкой очистки класса E10 превалирующее влияние на затраты начинает оказывать перепад давления на фильтрах. Естественно, что цена на фильтры более высокого класса имеют тенденцию плавного роста (линия 1). Оптимум общих затрат (кривая 4), приведенных на рис. 2, возникает при использовании фильтров класса E11.

Следует заметить, что при использовании классов очистки E12 загрязнение проточной части ГТУ практически не происходило. Однако, сумма общих затрат начинала расти.

Таким образом, тривиальный подход к повышению эффективности системы фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ только за счет повышения классов очистки фильтр элементов конечной (финишной) очистки КВОУ не всегда ведет к желаемому результату. Для выбора той или иной системы фильтрации циклового воздуха энергетической ГТУ необходимо выполнить сравнительный анализ всех затрат в течение срока эксплуатации в конкретных климатических условиях.

Кроме технических причин, решение выбрать какую-либо конфигурацию системы фильтрации циклового воздуха ГТУ основывается на экономических факторах. Эти факторы влияют на структуру расходов в течение срока эксплуатации и определение предельной точки экономичности, при которой более высокие цены на фильтры и более высокие значения начального перепада давления компенсируются за счёт издержек на устранение последствий деградации. Они включают в себя:

- Режим эксплуатации электростанции;
- Цены на энергоносители;
- Цены на топливный газ;
- Цены на фильтры;
- Частота замены фильтров;
- Скорость снижения выходной мощности;
- Скорость снижения КПД компрессора и, следовательно, скорость снижения эффективности электростанции;
- Начальный перепад давления (Δp) фильтров;

- Степень увеличения Δp фильтров (с учётом скорости снижения выходной мощности);
- Частота промывки компрессора ГТУ.

В исследовании [23] сервисной службой компании “GE Power” проанализированы два варианта различных конфигураций фильтров и классов фильтров, а именно: двухступенчатая конструкция с фильтрами G4/F8 (базовая) и трехступенчатая конструкция с фильтрами G4/F8/E11 (усовершенствованная). Конфигурации отличаются только наличием третьей ступени фильтрации, поэтому такие факторы, как капитальные затраты, эффект потери давления и т.д., рассчитываются только в отношении данной третьей ступени. Ранее установленная скорость деградации характеристик основана на анализе газотурбинных установок класса F, работающих на электростанциях с комбинированным циклом.

При анализе приняты следующие допущения: ТЭЦ функционирует 7000 часов в году, мощность ГТУ 280 МВт, количество фильтров класса E11 520 штук, начальный перепад давления на фильтре равен 132 Па, стоимость фильтра - \$120. Замена финишных фильтров КВОУ класса E11 должна производиться каждые три года.

На Рис.4.19 представлено графическое изображение различной степени снижения выходной мощности электростанции для базовой и усовершенствованной системы фильтрации циклового воздуха ГТУ, а также эффект начального перепада давления для этих систем.

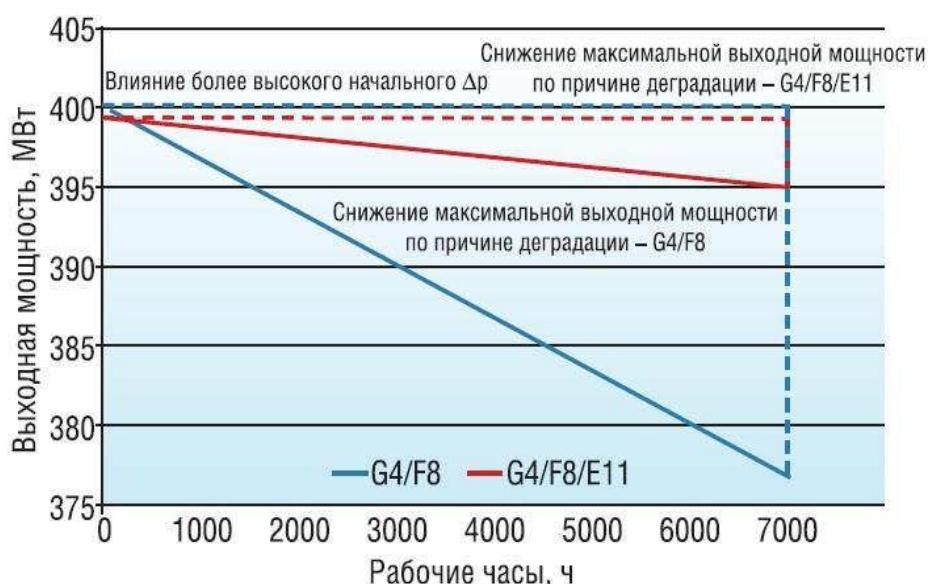


Рис.4.19. График снижения выходной мощности электростанции для базовой и усовершенствованной системы фильтрации циклового воздуха ГТУ.

Общая годовая выгода от установки третьей ступени фильтрации класса E11 достигает \$ 363 000. Отмечается, что полученная выгода сильно зависит от режима эксплуатации и времени работы электростанции с базовой нагрузкой и, следовательно, объёма дополнительной электроэнергии, которая может быть реализована в энергосеть с получением прибыли.

Компания Siemens AB так же рекомендует устанавливать современные трехступенчатые системы очистки воздуха с фильтрами конечной (финишной) ступени класс E12 [24]. Мировой опыт эксплуатации электростанций в условиях повышенной влажности подсказывает, что должно быть строгое распределение функций между ступенями фильтрации КВОУ. Одна ступень должна улавливать атмосферную влагу, другая крупнодисперсную пыль, а третья ступень – мелкодисперсные частицы. Кроме того, в случае экстремальных климатических условий, например, возникших в Москве в 2010 из-за лесных пожаров и резкого повышения перепада давления на фильтрах первой ступени, эти фильтр - элементы могут быть сняты [25]. В это время дорогостоящие фильтры класса E останутся под защитой фильтра второй ступени очистки.

Другим наглядным примером, подтверждающим правило № 3, является использование в весенне- летний период эксплуатации ГТУ дополнительной (сезонной) ступени очистки воздуха – противомоскитных сеток. Опыт эксплуатации противомоскитных сеток на КВОУ ГТУ показал их эффективность по очистке воздуха от двукрылых насекомых, тополиного пуха и других загрязняющих веществ во время цветения растений. Благодаря использованию противомоскитной защите удалось увеличить срок службы фильтров (работоспособное состояние) первой ступени КВОУ на два - три месяца [26].

Мы дали качественное (логическое) обоснование правила № 3. Теперь постараемся дать и количественное подтверждение этого правила. С этой целью обратимся к терминологии теории надежности [27].

Работоспособное состояние – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует нормативно- технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неработоспособное состояние – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего его способность выполнять заданные функции, не соответствует нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Таким образом, достижение предельно-допустимого значения перепада давления на фильтре согласно ГОСТ или стандарта означает переход его в неработоспособное состояние.

Отказ – переход объекта из работоспособного состояния в неработоспособное.

Вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени (кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается) называется **коэффициентом готовности** (K_g):

$$K_g = \frac{t_w}{t_w + t_p}$$

где t_w – суммарное время исправной работы объекта; t_p – суммарное время вынужденного простоя

Для перехода к вероятностной трактовке величины t_w и t_p заменяются математическими ожиданиями времени между соседними отказами и времени восстановления соответственно

$$K_g = \frac{t_{cp}}{t_{cp} + t_B}$$

где t_{cp} – наработка на отказ; t_B – среднее время восстановления.

Поскольку статические воздушные фильтры КВОУ в основном являются невосстанавливаемыми (изделие, которое не может быть восстановлено потребителем и подлежит замене), то в нашем случае можно воспользоваться понятием коэффициента технической готовности.

Коэффициент технической готовности (Ктг) – определяют, как отношение количества исправной и готовой к эксплуатации техники к ее инвентарному числу (в произвольный момент времени).

Тогда в случае одновременной потери работоспособности одной ступени фильтрации Ктг будет равен:

-трехступенчатой системы фильтрации: $2/3 = 0,6667$

-двухступенчатой системы фильтрации: $1/2 = 0,5$

-одноступенчатой системы: $0/1=0$.

Результаты этих несложных расчетов говорят сами за себя, подтверждая правило № 3.

Аналогичные результаты можно получить, анализируя вероятность безотказной работы ступеней фильтров (вероятность того, что в пределах заданной наработки t отказ не возникнет):

$$P(t) = N_p/N = 1 - n(t)/N,$$

где N_p – число работоспособных объектов на момент t ;

N – общее число наблюдаемых объектов;

$n(t)$ – число объектов, отказавших на момент t .

В случае отказа одной ступени в рассматриваемых системах фильтрации в момент времени t вероятность безотказной работы трехступенчатой системы фильтрации будет выше, чем у остальных.

Правило № 4 очевидно. Любой объект характеризуется качеством. Надежность является составляющим показателем качества объекта. Чем выше надежность объекта, тем выше его качество и меньше риски отказа [28].

Надежность объекта закладываются на стадии его проектирования. На надежность объекта влияют: выбор материалов (прочность материалов, износостойкость, водостойкость, горючесть), запасы прочности деталей и конструкции в целом, механическая и тепловая напряженность конструктивных элементов.

На стадии изготовления надежность определяется выбором технологии производства, соблюдением технологических допусков, качеством обработки сопрягаемых поверхностей, качеством используемых материалов, тщательностью сборки и герметичностью.

Другими словами, на стадии проектирования и изготовления определяются конструктивно-технологические факторы, влияющие на надежность объекта. Действие этих факторов выявляется на стадии эксплуатации объекта.

Наши исследования воздушных фильтров [29-31], а также опыт эксплуатации систем фильтрации циклового воздуха ГТУ показали, что наиболее надежными являются фильтр элементы тонкой очистки, имеющие наибольшее значение давление на разрыв (более 6000 Па), как в сухом, так и влажном состоянии, изготовленные из гидрофобного, гофрированного фильтровального материала, имеющую вертикальную укладку, прочную

рамку и защитную решетку фильтровального материала, изготовленные из АБС пластика, обеспечивающие герметичность фильтра от протечек атмосферной влаги и частиц пыли.

Резюме:

Предложенные Общие правила (здравого смысла) позволят инженерному составу энергетических компаний найти правильное решение при выборе оптимальной системы фильтрации циклового воздуха ГТУ.

4.8. Входной контроль воздушных фильтров для энергетических ГТУ

Входной контроль воздушных фильтров для КВОУ ГТУ должен проходить несколько стадий проверки. **Первая стадия** – это работа с заявками потенциальных поставщиков продукции во время открытого запроса предложений (ОЗП). Выполняется проверка соответствия представленных в заявках технических характеристик воздушных фильтров требованиям, предъявляемым к ним в техническом задании (ТЗ). Техническое задание на воздушные фильтры для КВОУ составляется на основании действующих ГОСТ и стандартов, а также результатов мониторинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе воздухозаборного тракта ГТУ.

Представляемая продукции должна соответствовать не только требуемым габаритным размерам и классам очистки (эффективности), но и конкретным климатическим условиям эксплуатации данного оборудования в соответствии с ГОСТ 15150-69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды» [32].

Для подтверждения технических характеристик изделий заказчик запрашивает тесты, выполненные в лабораториях независимых институтов. К ним относятся тесты на определение начального перепада давления и эффективность очистки воздушных фильтров, низкотемпературные испытания (для конкретного климатического района).

Эти требования обусловлены тем, что ряд поставщиков такой продукции предоставляет тесты, выполненные в собственных лабораториях. В результате чего в процессе эксплуатации выявляется не соответствие паспортных данных фильтров требованиям ТЗ.

ГОСТ 15150-69 распространяется на все виды машин, приборов и других технических изделий (далее - изделия) и устанавливает макроклиматическое районирование земного шара, исполнения, категории, условия эксплуатации, хранения и

транспортирования изделий в части воздействия климатических факторов внешней среды. Все требования настоящего стандарта являются обязательными (за исключением требований, установленных как рекомендуемые или допускаемые) как относящиеся к требованиям безопасности.

Настоящий стандарт должен применяться при проектировании и изготовлении изделий. В частности, он должен применяться при составлении технических заданий на разработку или модернизацию изделий, а также при разработке государственных стандартов и технических условий, устанавливающих требования в части воздействия климатических факторов внешней среды для группы изделий. Изделия должны сохранять свои параметры в пределах норм, установленных техническими заданиями, стандартами или техническими условиями в течение сроков службы и сроков сохраняемости, указанных в технических заданиях, стандартах или технических условиях, после и (или) в процессе воздействия климатических факторов, значения которых установлены настоящим стандартом.

Климатические испытания фильтров

Для точного моделирования агрессивного воздействия окружающей среды на технические изделия при эксплуатации их в реальных условиях используются испытательные климатические камеры (Climate chamber), которые имеют высокоточные измерительные приборы для контроля влажности и температуры воздуха. Камеры тепла и холода для испытаний по российским ГОСТам и международным стандартам, на воздействие пониженной и/или повышенной температур работают по заданным программам [33].

К климатическим камерам предъявляются требования, изложенные в ГОСТ Р 53616-2009 (Требования к характеристикам камер для испытаний технических изделий на стойкость к внешним воздействующим факторам. Методы аттестации камер (без загрузки) для испытаний на стойкость к воздействию влажности) и ГОСТ Р 53618-2009 (Требования к характеристикам камер для испытаний технических изделий на стойкость к внешним воздействующим факторам. Методы аттестации камер (без загрузки) для испытаний на стойкость к воздействию температуры), устанавливающих порядок аттестации испытательных камер тепла, холода и влаги.

В соответствии с требованиями нормативных документов испытательное оборудование перед началом эксплуатации и периодически, в процессе его применения, подлежит аттестации. Порядок аттестации регламентирован ГОСТ Р 8.568-2017 «Аттестация

испытательного оборудования. Основные положения».

По своему назначению климатические камеры подразделяются на несколько видов. Приведем некоторые из них:

Камеры тепла-холода предназначены для испытаний изделий в широком диапазоне повышенных и пониженных температур.

Климатические камеры дождя используются для проведения испытаний на устойчивость к дождю и на влагопроницаемость.

Климатические камеры песка и пыли предназначены для проведения испытаний на устойчивость к воздействию песка и пыли.

Климатические камеры старения используются для проведения испытаний на устойчивость к старению при повышенных температурах, влажности и интенсивности света.

Климатические камеры тепло-холод-влажность предназначены для проведения испытаний при повышенных, пониженных температурах и повышенной влажности при повышенных температурах.

В зависимости от своего предназначения климатические камеры имеют свои технические особенности.

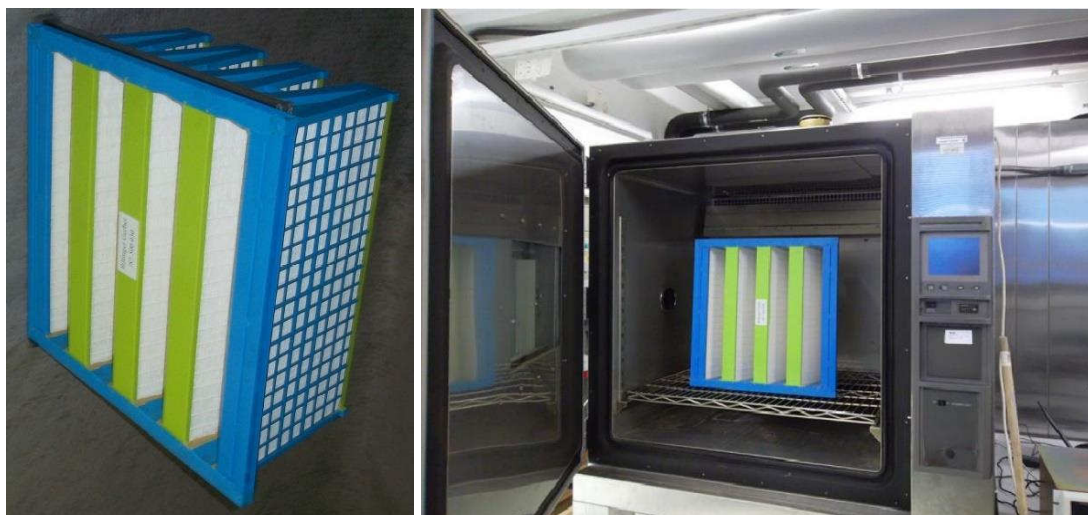
Ниже, для примера, приведены технические особенности климатической камеры тепло-холод-влажность:

- материал рабочей камеры – нержавеющая сталь;
- циркуляция воздуха рабочей камеры - принудительная, центробежным вентилятором, регулируемая в горизонтальном или вертикальном направлении;
- регулирование температуры – цифровой программируемый контроллер с высокоточным платиновым термодатчиком, с простым интуитивным интерфейсом;
- конфигурация циркуляционной системы обеспечивает максимальное перемешивание воздушных потоков и, как следствие, более однородную по влажности и температуре рабочую среду;
- дверца оснащена большим смотровым окном с тройным стеклопакетом и освещением рабочей камеры;
- большой выбор модификаций позволяет подобрать оптимальный вариант по

соотношению полезный объем/разница температур.

Ниже представлены результаты тестирования фильтра тонкой очистки (ФТО) компании М с размерами 592x592x300 мм, площадью фильтрации 20 м² (Рис.4.20а).

Фильтровальный материал чистой стороны ФТО защищен пластмассовой решеткой, обеспечивающей повышенную прочность конструкции и давление на разрыв.



а

б

Рис.4.20. Фильтр тонкой очистки: а- перед тестом; б- в климатической камере [33]

Целью климатических испытаний в зарубежной независимой лаборатории являлось подтверждение начального перепада давления и эффективности воздушного фильтра до и после нахождения фильтра тонкой очистки при температуре -60⁰С в течение нескольких часов.

Перед проведением испытания в климатической камере было выполнено тестирование ФТО для определения его начального перепада давления и эффективности. После чего, были проведены климатические испытания фильтра при пониженной температуре соответствующей средней из абсолютных годовых минимумов (повторяемость 1 раз в 1-2 года в течение 6 часов) ⁰С для района ХЛ согласно ГОСТ 15150-69.

На Рис.4.20б изображен ФТО, установленный в климатическую камеру тепла и холода. Термограмма испытаний фильтра тонкой очистки приведена на Рис.4.21. ФТО выдерживался в течение 7 часов 20 минут при температуре +25⁰С, после чего постепенно (за 1,5 часа) температура окружающей среды была снижена до величины минус 60⁰С. Фильтр выдерживался при этой температуре в течение 8 часов, после чего также постепенно температура была повышена до начальной величины +25⁰С.

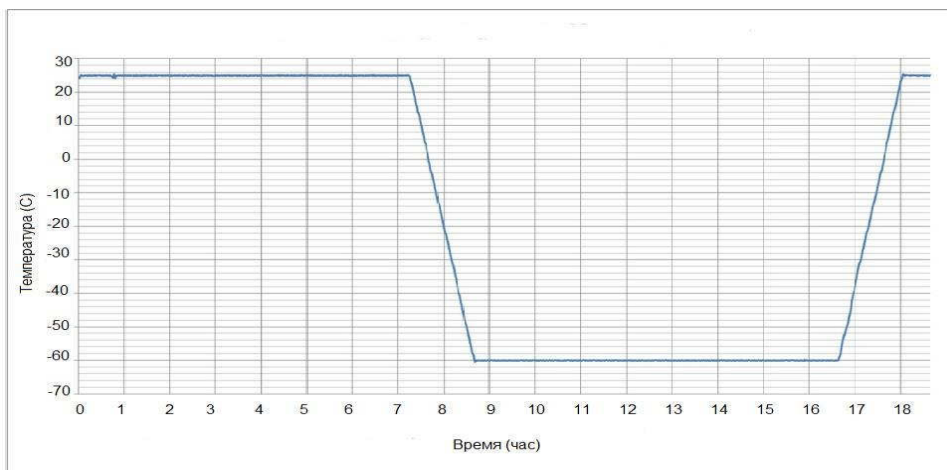


Рис.4.21. Термограмма испытания фильтра тонкой очистки

После проведения климатических испытаний осуществлялся визуальный контроль состояния фильтра тонкой очистки с целью обнаружения дефектов корпуса фильтра, его защитной сетки, герметизации стыков корпуса фильтра с фильтровальным материалом, фильтровального материала, прокладки фильтра и ее крепления к корпусу фильтра. Состояние фильтра до и после климатических испытаний фиксировалось с помощью фотоаппаратуры для выполнения сравнительного анализа. Каких-либо нарушений целостности фильтр - элемента после климатических испытаний не было зафиксировано. После этого было выполнено тестирование фильтра на аэродинамическом стенде для определения начального перепада давления.

На Рис.4.22 представлены результаты тестирования фильтра до и после его испытания в климатической камере.



Рис.4.22. Графики начального перепада давления фильтра: 1- до; 2- после климатических испытаний

Как видно из представленных данных результаты замеров до и после климатических испытаний легли на одну кривую. Таким образом, влияния низких температур на важный параметр технических характеристик фильтра тонкой очистки не было обнаружено. Начальный перепад давления фильтра определялся для расхода воздуха 3400 м³/ч и составил 110 Па.

На Рис.4.23 и табл.4.7 представлены результаты тестирования ФТО по определению его эффективности согласно ГОСТ Р ЕН 779:2014 до и после климатических испытаний.

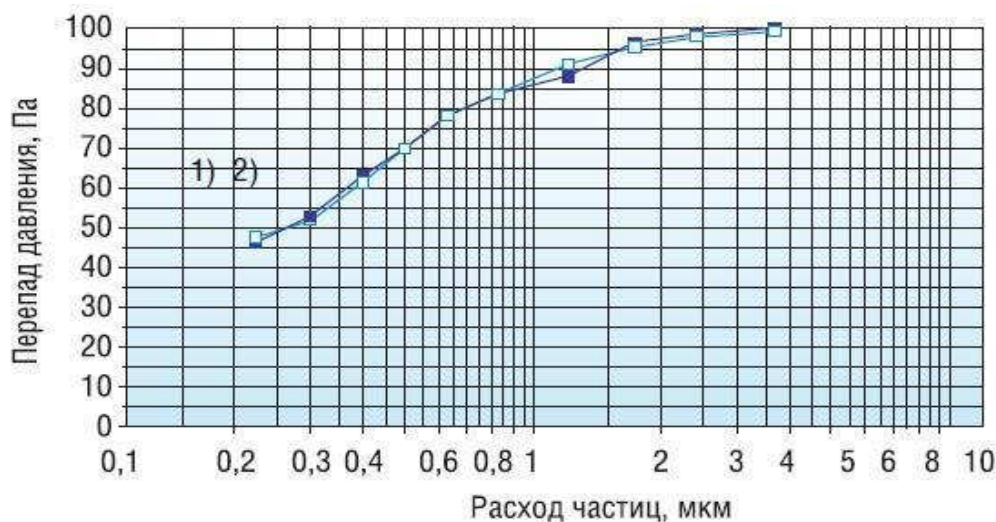


Рис.4.23. Графики эффективности фильтра: 1- до; 2 -после климатических испытаний при -60 °С в течение 8 ч

Табл.4.7. Эффективность фильтра до и после испытаний

Размер частиц, мкм		Эффективность %	
Интервал	Среднее	110 Па до	110 Па после
0.20 ... 0.25	0.22	47.3 ± 2.5	47.9 ± 1.5
0.25 ... 0.35	0.30	53.3 ± 1.7	53.0 ± 1.3
0.35 ... 0.45	0.40	62.0 ± 1.6	61.1 ± 1.7
0.45 ... 0.60	0.52	70.5 ± 1.5	70.2 ± 1.6
0.60 ... 0.75	0.67	78.2 ± 1.6	78.3 ± 1.0
0.75 ... 1.00	0.87	84.6 ± 1.0	84.5 ± 1.2
1.00 ... 1.50	1.22	89.4 ± 0.9	91.1 ± 1.6
1.50 ... 2.00	1.73	95.8 ± 0.3	95.5 ± 0.5
2.00 ... 3.00	2.45	99.3 ± 0.2	99.1 ± 0.3
3.00 ... 4.50	3.67	99.9 ± 0.1	99.9 ± 0.1

Как видно из представленных графиков кривые эффективности фильтра до и после его испытания в климатической камере практически не отличались друг от друга. Незначительное рассогласование величин отмечалось в диапазоне дисперсности частиц размером 1-1,5 мкм. Данные, приведенные в Табл.4.7, показывают численные значения этих расхождений. Таким образом, фильтр тонкой очистки, подвергшийся низкотемпературным испытаниям, подтвердил свою эффективность и начальный перепад давления.

Климатические испытания осуществляются не только с целью определения (подтверждения) технических характеристик фильтров, но и для оценки прочности их конструкции, стойкости пластмассовых и резиновых компонентов фильтр – элементов к низким температурам окружающей среды свойственным климатическим условиям эксплуатации оборудования в районах крайнего Севера.

На Рис.4.24 приведен пример растрескивания элемента фильтра после низкотемпературных испытаний при температуре минус 60⁰С ввиду хрупкости пластмассового материала.



Рис.4.24. Скол пластмассы рамки фильтра после испытаний в климатической камере

Для подтверждения результатов визуального контроля фильтров после климатических испытаний целесообразно их тестирование масляным туманом согласно стандарта EN 1822-4 (ГОСТ Р EN 1822-4) и определение водостойкости статическим (гидростатическим давлением) или динамическим (с помощью распыла воды через форсунки) способами [34,35].

В соответствии с экономической и технической целесообразностью производитель может изготавливать изделия пригодными для эксплуатации в нескольких районах и (или) местах размещения, установленных ГОСТ 15150-69. В этом случае изготовитель

продукции обязан выполнить тесты своего оборудования для более жестких климатических условий. Однако, потребитель продукции, эксплуатирующий свое оборудование в районах с более мягкими климатическими условиями не имеет право требовать от поставщиков этой продукции тестов для более жестких климатических условий, поскольку это будет являться нарушением технического задания на продукцию и ГОСТ 15150-69. Несмотря на очевидность этого положения, на практике имел место случай, когда компания, осуществляющая тендерную процедуру для одной из ТЭЦ в районе Сочи, потребовала от поставщика воздушных фильтров тесты низкотемпературных испытаний с глубиной заморозки до минус 60С. Для климатических условий Москвы также недопустимо требование заказчика тестирования технических изделий при температурах минус 60⁰С и ниже, поскольку столичный регион относится к району с умеренным (континентальным) климатом, где средняя из ежегодных абсолютных максимумов температура воздуха равна или ниже плюс 40°С, а средняя из ежегодных абсолютных минимумов температура воздуха равна или выше минус 45°С. В Табл.4.8 приведены суточные рекорды температуры атмосферного воздуха в Москве за всю историю метеонаблюдений [36].

Табл. 4.8. Суточные рекорды температуры в Москве за всю историю метеонаблюдений

Место	Самый жаркий день, °С	Дата	Метеостанция	Самый холодный день, °С	Дата	Метеостанция
1	39,0	29.07.2010	Балчуг	-42,2	17.01.1940	ТСХА
2	37,5	26.07.2010	ВВЦ	-41,9	27.01.1892	ТСХА
3	37,5	28.07.2010	ВВЦ	-41,1	18.01.1940	ТСХА
4	37,3	06.08.2010	ВВЦ	-41,0	16.01.1940	ТСХА
5	37,2	04.08.2010	ВВЦ	-40,0	20.01.1942	ТСХА
6	36,9	02.08.2010	ВВЦ	-38,8	28.12.1942	ТСХА
7	36,8	07.08.1920	ТСХА	-38,6	23.01.1892	ТСХА
8	36,7	24.07.2010	ВВЦ	-38,2	06.02.1929	ТСХА
9	36,6	05.08.2010	ВВЦ	-38,1	31.01.1956	ВВЦ
10	36,5	30.08.1936	ТСХА	-38,0	31.12.1978	ВВЦ

Резюме:

1. Моделирование климатических условий эксплуатации воздушных фильтров в реальных условиях с помощью климатических камер должно стать обязательным условием проверки технических характеристик фильтр – элементов и их конструкции.

2. Тестирование воздушных фильтров в климатических камерах должно осуществляться в точном соответствии с техническим заданием на продукцию и ГОСТ 15150-69 для конкретного макроклиматическое районирования.

Последующие стадии входного контроля воздушных фильтров

Вторая стадия входного контроля предусматривает внешний осмотр образцов фильтров, представленных потенциальными поставщиками данной продукции во время ОЗП. Процедура начинается с внешнего осмотра образцов, проверки отсутствия повреждений, соответствие маркировки фильтров требованиям ГОСТ, наличия указателей правильной установки фильтров в КВОУ при ее неочевидности и другие позиции, перечисленные в разработанных чек – листах [37].

Третья стадия входного контроля осуществляется во время поставки воздушных фильтров для КВОУ заказчику. Определяется процентное содержание фильтров от общего количества поставки подвергается выборочному входному контролю. Процедура этого входного контроля аналогична второй стадии за исключением того, что в данном случае проверяются серийные воздушные фильтры, а не специально подготовленные их образцы. По этой причине во время входного контроля серийной продукции выявляется большее количество недостатков.

На рис.4.25 показан входной контроль кассетных воздушных фильтров турецкой компании М, проводимый во время ОЗП и на ТЭЦ.



а

б

Рис.4.25. Входной контроль фильтров турецкой компании М: а- во время тендерной процедуры; б- во время приемки на ТЭЦ [37]

На стадии входного контроля поставляемой продукции необходимо проводить тестирование не образцовых, а серийных фильтров элементов в независимых институтах, аккредитованных по ISO/IEC 17025-2017. Этому стандарту полностью идентичен межгосударственный стандарт ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».

Определение эффективности и начального перепада давления воздушных кассетных фильтров тонкой очистки (ФТО) типа MV и MVX осуществлялось в лабораториях двух независимых институтов, аттестованных по ISO 17025-2017: в шведском Research Institutes of Sweden AB (RISE), известном под аббревиатурой SP и финском Technical Center of Finland (VTT) (Рис.4.26). Другие виды тестирования фильтров выполнялись на испытательных стендах компании Toras.



Рис.4.26. Независимый институт VTT (Финляндия)

Обследовались новые серийные кассетные ФТО марок MV и MVX, отличающиеся габаритными размерами, классов очистки F8-F9 (Табл.4.9).

Табл.4.9. Параметры новых ФТО MV MVX

Класс	Габаритные размеры, мм	Площадь фильтрации, м ²	Паспортные / измеренные / расхождение	
			Начальный перепад давления P, Па (%)	Класс энергоэффективности (Eurovent)
MV-F8	592×592×292	22/22/0	90/90/0 (0 %)	A/A/A
MV-F9			96/90/0 (0 %)	A/A/A
MVX-F8	592×592×440	32/32/0	85/85/0 (0 %)	A/A/A
MVX-F9			32/30,3/1,7 (-5,3 %)	87/89/2 (+2,3 %)

Для полной идентификации этих фильтров проверялось соответствие их паспортных данных техническим характеристикам, приведенным на официальном Web-site иностранного производителя. В процессе проверки было установлено, что все названия фильтров и их технические характеристики, как в паспортах фильтр - элементов, представляемых отечественным дистрибьютером, так и на официальном сайте производителя, полностью идентичны.

Перед проведением тестирования выполнялся внешний осмотр и взвешивание фильтров. Во время внешнего осмотра ФТО видимых повреждений не обнаружено. В табл.4.10 представлены сравнительные данные паспортных и фактических значений весовых характеристик этих фильтров.

Табл.4.10. Масса фильтров ФТО MV MVX (г)

	Паспортная	Измеренная	Разница
MV-F8	7000	7264	+264
MV-F9	7000	6987	-13
MVX-F8	10 000	10 335	+335
MVX-F9	10 000	10 822	+822

В независимых институтах методом расчета была проверена эффективная площадь фильтрации образцов фильтров. В процессе этой процедуры было установлено, что данный параметр для фильтр-элементов типа MV F8-F9, а также MVX F8 полностью совпадает с паспортными значениями. Расчетная площадь фильтрации MVX F9 оказалась меньше заявленной в паспорте на 1,7 кв. м.

На испытательных стендах тестирование образцов фильтров осуществлялось при расходе воздуха 3400 м³/ч. На Рис.4.27 изображен фильтр MVX F9, установленный на стенде для определения начального перепада давления и эффективности очистки воздуха.



Рис.4.27. ФТО MVX класса F9 на испытательном стенде

При тестировании фильтров проверялся их начальный перепад давления и класс очистки, указанный в паспортах. Результаты определения фактических значений этих параметров ФТО и сравнение их с паспортными значениями приведены в Табл.4.9.

Как видно из Табл.4.9 начальные перепады давления ФТО, зафиксированные в процессе тестирования на испытательных стендах институтов VTT и SP полностью совпали с паспортными значениями фильтр – элементов MV F8-F9 и MVX F8. Для ФТО MVX F9 отмечено отклонение фактического значения начального перепада давления от паспортного на 2,3%. Согласно ГОСТ ЕН Р 779-2014 оборудование для измерения перепадов давления должно иметь погрешность не более ± 2 Па в диапазоне от 0 до 70 Па. При перепадах давления более 70 Па погрешность измерений должна находиться в диапазоне ± 3 % значения измеряемой величины. Следовательно, результаты измерения начального перепада давления фильтра MVX F9 находятся в пределах точности измерений стенда.

Следует отметить, что согласно требований компании Siemens AG [38], начальный перепад давления на фильтрах класса F7-F9 должен быть менее 100 Па. Следовательно, эти фильтр – элементы соответствуют данному критерию оценки воздушных фильтров, допускаемых к использованию в системах фильтрации циклового воздуха ГТУ этого производителя.

После фиксации начального перепада давления и изменения его значений в процессе подачи тестовой пыли, расчетным путем определялась энергоэффективность воздушных фильтров. Все фильтры, представленные для тестирования в независимые институты, подтвердили высокие классы своей энергоэффективности: MV F8-F9 и MVX F8 – класс “А”, а MVX F9- класс “А+” согласно Eurovent 4/21 -2014.

Безусловно, что к. п. д. осевого компрессора ГТУ выше, чем у вентилятора, используемого при тестировании воздушных фильтров. Несмотря на это, классы энергоэффективности воздушных фильтров дают представление об энергопотреблении продукции того или иного поставщика и позволяют осуществить ее осмысленный выбор, приводящий к увеличению эффективности работы энергооборудования.

Помимо энергоэффективности, другим не менее важным параметром воздушных фильтров является их класс очистки, который определяется в процессе тестирования фильтр элементов путем подачи в них специальной тестовой аэрозоли. На рис.4.28 представлены зависимости начальной и средней эффективности улавливания частиц 0,1-10 мкм фильтр- элементом MVX F9 в зависимости от перепада давления на нем. Как видно из представленных графиков, с ростом перепада давления на фильтре,

обусловленного подачей тестового аэрозоля, эффективность очистки воздуха возрастает.

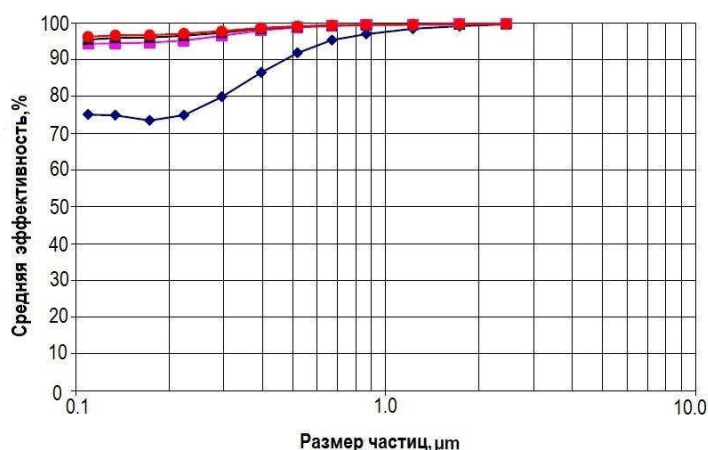
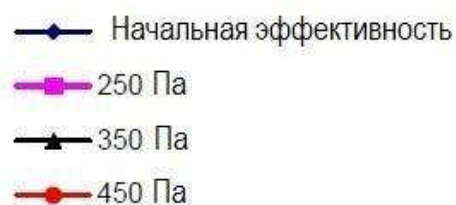


Рис.4.28. График изменения начальной и средней эффективности фильтра MVX F9 в зависимости от перепада давления:



Все протестированные в лабораториях независимых институтов фильтры тонкой очистки типа MV и MVX подтвердили свой класс очистки (эффективности).

В соответствии с ТЗ все фильтр элементы, предназначенные для КВОУ, должны эксплуатироваться в климатических условиях Москвы до 100% относительной влажности. Для определения резистентности фильтровального материала и проверки герметичности конструкции фильтр – элементов их подвергают проверке на водостойкость путем статических и динамических испытаний. Статические испытания на водостойкость представляют собой наполнение водой V-образных секций кассетных фильтров. Для визуализации протечек через фильтровальный материал и его уплотнения с рамкой фильтр – элемента целесообразно использовать подкрашенную воду.

На Рис.4.29 зафиксирован момент тестирования фильтр – элемента MVX F9 на водостойкость. В процессе испытаний протечек через полностью заполненную водой V-образную секцию фильтра в течение 10 минут не было зафиксировано. Результаты этого теста подтверждают паспортные данные фильтр- элемента, а именно:

- фильтрующий материал – гидрофобное стекловолокно;

- герметичность стыков фильтровального материала с рамкой фильтра со стороны входа и выхода обеспечена.



Рис. 4.29. Тест на водостойкость фильтра MVX F9

Еще одним важным показателем надежности и безопасности воздушных фильтров тонкой очистки, устанавливаемых на последней (финишной) ступени фильтрации КВОУ является давление на разрыв. Данный метод тестирования позволяет оценить механическую прочность фильтра в соответствии с перепадом давления при номинальном расходе воздуха. Фильтр подвергается пылевой нагрузке для постепенного увеличения перепада давления. Визуальный осмотр фильтра используется для определения повреждений фильтра при различных значениях перепада давления. Тестирование фильтр элемента осуществляется до разрыва фильтра (визуальное повреждение фильтра) или по достижению максимальной мощности вентилятора испытательного стенда. На рис.4.30 показан фильтр MVX F9 турецкой компании М после тестирования на разрыв.



Рис.4.30. Фильтр MVX F9 после тестирования на разрыв

Производитель КВОУ компания FAIST AIS, настоятельно рекомендует, чтобы финишные фильтры выдерживали давление на разрыв более 6000 Па. Тестирование фильтра MVX F9 было остановлено при давлении 6100 Па по достижению максимальной мощности вентилятора испытательного стенда. При визуальном осмотре фильтра после испытаний повреждений фильтровального материала, рамки фильтра и уплотнений не было обнаружено.

В процессе эксплуатации начальный перепад давления фильтров определяется в первый день установки их в КВОУ при номинальной нагрузке ГТУ и 100% открытии входного направляющего аппарата (ВНА) компрессора турбомшины. Зафиксированные величины начального перепада давления фильтров и их паспортные значения заносятся в паспорта загрязненности воздуха КВОУ ГТУ ТЭЦ. Таким образом, устанавливается расхождение между фактическим и заявленным значением начального перепада давления фильтров. Именно, фактические значения начального перепада давления являются точкой отсчета при определении реального срока службы фильтров КВОУ при достижении на них предельно-допустимого перепада давления согласно ГОСТ

Такие меры контроля качества поставляемой продукцией на стратегические объекты, к которым относятся ТЭЦ, обусловлены тем, что в процессе эксплуатации было установлено отличие характеристик образцов фильтр элементов, представляемых на входной контроль параметрам серийной продукции. Это не в последнюю очередь связано с тем, что ряд иностранных производителей воздушных фильтров локализовало свое производство в нашей стране, но при этом не осуществляет должный контроль качества выпускаемой здесь продукции.

Большая исследовательская работа по тестированию серийных воздушных ФТО для КВОУ компании Е была проведена нами с целью выявления несоответствия заявленных производителем технических характеристик их фактическим значениям [39]. Определение эффективности и начального перепада давления на фильтрах осуществлялось в Research Institutes of Sweden AB (RISE), известным под аббревиатурой SP (Рис.4.31). Научно-исследовательский институт SP королевства Швеции аккредитован согласно ISO/IEC 17025:2015. Институты, научные центры и лаборатории, аккредитованные по ISO/IEC 17025:2005 (ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2019) являются независимыми и результаты тестирования, выполненные ими, принимаются для сравнительной оценки различных образцов оборудования, предоставляемых во время входного контроля, при проведении открытых запросов предложений тендерных процедур. Другие виды тестирования фильтров выполнялись на испытательных стендах компании Topas.



Рис.4.31. Независимый научно-исследовательский институт SP королевства Швеции

Обследованию были подвержены новые серийные ФТО классов очистки F7- E11, паспортные технические характеристики которых представлены в Табл.4.11.

Табл.4.11. Параметры новых ФТО немецкой компании E

Класс	Паспортные			Измеренные			Данные с сайта производителя**
	Размеры, мм	Площадь фильтрации, кв. м	Начальный перепад давления (P), Па	Площадь фильтрации, кв. м	Начальный перепад давления (P), Па	Превышение измеренных P над паспортными, Па (%)	
E11-31/38	592×592×400	38,0	140	31,7	150	10 (7,1 %)	E11-31 = 155 E11-38 = 150
E10-31/38	592×592×400	38,0	114	28,8	135	21 (18, 4%)	E10-31 = 130 E10-38 = 125
F9-23(3x)	592×592×400	23,0	78	21,3	85	7 (9 %)	80
F8-20	592×592×296	20,0	88	18,0	106	18 (20,5 %)	100
F7-20RF	592×592×296	20,0	70	18,0	89/100	18 (27,1 %) / 30 (42,9 %)	F7-20 = 80

Для полной идентификации фильтров тонкой очистки проверялось соответствие их паспортных данных техническим характеристикам, представленным на официальном Web-site западного производителя. В паспортах фильтров E10-31/38 и E11- 31/38, указано, что они произведены за рубежом, однако на Web-site производителя фильтры с таким обозначение отсутствуют. Там приведены технические характеристики фильтров E10-31, E10-38 и E11-31, E11-38 (цифры 31 и 38 обозначают площадь фильтрации). Для конкретного типа фильтров даны величины начального перепада давления (см. Табл.4.11).

В паспортах фильтров E10-31/38 и E11- 31/38, несмотря на их обозначение, указано, что площадь фильтрации равна 38 м². Не совсем понятно, о какой площади фильтрации идет речь (общая или эффективная, участвующая в процессе фильтрации) и зачем приводится

двойное обозначение, отличающееся от информации на официальном Web-site западного производителя фильтров. Следует отметить, что на лейблах ФТО E10-31/38 была указана площадь фильтрации $> 38 \text{ м}^2$. Это противоречит информации представленной как в паспортах фильтров, так и на официальном Web-site производителя.

В институте SP методом расчета была проверена эффективная площадь фильтрации E10-31/38, которая составила $28,8 \text{ м}^2$. В качестве ремарки заметим, что эффективная площадь фильтрации не может отличаться от общей на 10 м^2 . В результатах теста фильтра E10-31, выполненного в собственной лаборатории западного производителя, указано, что эффективная площадь фильтрационного материала равна $27,15 \text{ м}^2$.

Эффективная площадь фильтрации E11 - 31/38 определялась двумя способами: расчета и препарирования. Расчетная площадь фильтрации составила 32 м^2 , а методом препарирования - $31,7 \text{ м}^2$. У остальных тестируемых фильтров эффективная площадь фильтрации определялась методом расчета. Для фильтров F7-F8 она составила 18 м^2 , а для F9 – $21,3 \text{ м}^2$ (см. Табл.4.11).

Как видно из данных приведенных в Табл.4.11 начальные перепады давления ФТО на официальном Web-site западного производителя отличаются в большую сторону, чем указано в паспортах фильтров.

Информация о технических характеристиках фильтра тонкой очистки F7- 20RF (RF-реверсная установка по отношению к финишному фильтру) на Web-site производителя фильтров не была обнаружена, поэтому в Табл.4.11 включены данные с этого сайта для фильтра F7- 20.

В паспорте фильтра F9-23 указана его энергоэффективность, соответствующая “А+”, согласно Eurovent 4/21 -2014, хотя фильтры этого производителя не аттестованы компанией Eurovent . Поэтому такая информация отсутствует на официальном Web-site производителя фильтров.

Налицо противоречие технических характеристик, представленных на официальном Web-site западного производителя этой продукции и в паспортах фильтров российского дилера этой компании.

Перед проведением тестирования выполнялся внешний осмотр и взвешивание фильтров. Видимых повреждений во время внешнего осмотра ФТО не обнаружено. Согласно рекомендациям компании FAIST, при реверсной установке фильтров пластмассовая

защитная сетка должна быть установлена на чистой стороне фильтр - элемента, то есть в его V-образных секциях. Однако, защитных сеток на фильтре F7- 20RF не было обнаружено. На Рис.4.32 изображено взвешивание ФТО, а в Табл.4.12 представлены весовые значения новых фильтров.



Рис.4.32. Взвешивание ФТО класса E10

Табл.4.12. Весовые значения новых фильтров немецкой компании E

Марка фильтра	Паспортные данные, гр.	Измеренные значения, гр.	Разница измеренных и паспортных значений, г.
F7 RF-20	6700	6500	- 200
F8-20	6470	7072	+ 602
F9-23	7250	7640	+ 390
E10-31/38	9120	10107	+ 987
E11-31/38	10440	9550	- 890

После взвешивания фильтров для проверки их герметичности и наличия свищей в фильтровальном материале, фильтр - элементы подвергались тестированию так называемой масляной нитью. В процессе этого теста пары масла подаются внутрь фильтр - элемента. При визуальном обнаружении проникновения масляных паров через поверхность фильтра фиксируются проблемные места. На Рис.4.33 приведен процесс тестирования фильтра E11-31/38 масляной нитью.

На испытательных стендах тестирование образцов фильтров осуществлялось при расходе воздуха 3400 м³/ч. При этом проверялся начальный перепад давления на фильтрах и класс очистки, указанный в их паспортах. Результаты определения фактических значений этих

параметров ФТО и сравнение их с паспортными значениями приведены в Табл.4.12.



Рис.4.33. Тестирование фильтра E11-31/38 масляной нитью

На Рис.4.34 изображен фильтр E10-31/38, установленный на испытательном стенде института SP.

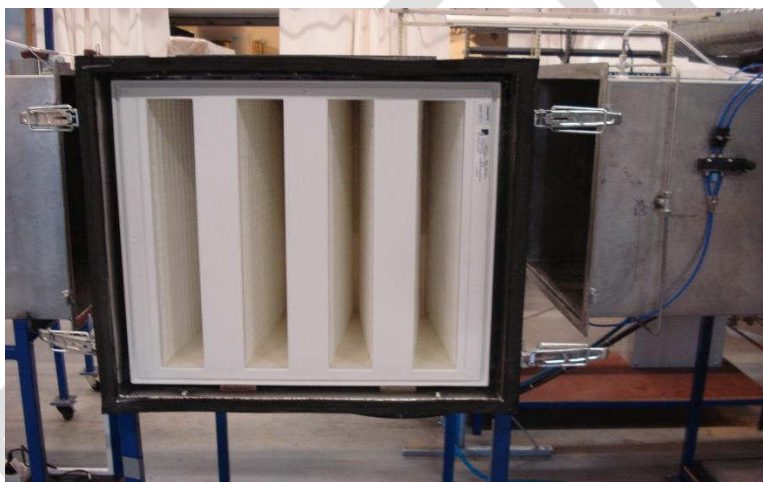


Рис.4.34. Фильтр E10-31/38 на испытательном стенде института SP

Согласно ГОСТ EN P 779-2014, который идентичен европейскому региональному стандарту EN 779:2012, оборудование для измерения перепадов давления должно иметь погрешность не более ± 2 Па в диапазоне от 0 до 70 Па. При перепадах давления более 70 Па погрешность измерений должна находиться в диапазоне $\pm 3\%$ значения измеряемой величины.

Погрешность измерений расхода воздуха, перепада давления на фильтр - элементе и относительной влажности воздуха на оборудовании стенда SP, предназначенного для тестирования фильтров класса “E” лучше, чем $\pm 3\%$.

Ошибка в определении эффективности фильтрации фильтра элемента составляет:

$\eta = 0-90\%$	$\pm 0,1^*$ проходящего объема [%]
$\eta = 90-99\%$	$\pm 0,2^*$ проходящего объема [%]
$\eta = 99-99,99\%$	$\pm 0,5^*$ проходящего объема [%]
$\eta > 99,99\%$	$\pm 1,0^*$ проходящего объема [%].

Тестирование фильтров тонкой очистки марки МРК классов F7 –E11 показало их соответствие заявленной эффективности согласно стандартов ГОСТ Р EN 779:2014 и EN 1822:2011 (ГОСТ Р EN 1822:2012).

При определении фактического начального перепада давления на этих фильтрах во время тестирования зафиксированы результаты, отличающиеся как от величин, представленных на официальном Web-site производителя, так и в паспортах фильтров. В процессе эксплуатации новых фильтров F7- 20RF, установленный реверсно к финишному ФТО, был определен фактический начальный перепад давления на фильтре равный 102 Па, что практически совпало с результатами стендовых испытаний (100 Па) и полностью противоречит паспортным данным фильтра (70 Па). Поскольку на Web-site производителя отсутствует информация об этом фильтре, нами было выполнено тестирование этого образца при базисной (не реверсной) установке F7- 20. В этом случае начальный перепад давления составил 89 Па, что превышает значение этих величин и на Web-site производителя (80 Па), и в паспорте фильтра.

Аналогичная ситуация, возникла и с ФТО класса F8-20. Начальный перепад давления на новых фильтрах, зафиксированный в начале процесса эксплуатации составил 107 Па, а результат теста на испытательном стенде -106 Па. Согласно паспортным данным этих фильтров, представленных российским дилером иностранной компании, начальный перепад давления равен 88 Па, при этом на Web-site головного офиса производителя этих фильтров указана величина 100 Па.

Мы уже отмечали, что согласно требованиям компании Siemens AG, начальный перепад давления на фильтрах класса F7-F8 должен быть <100 Па. Следовательно, эти фильтры не должны использоваться в системах фильтрации циклового воздуха ГТУ этого производителя.

На Рис.4.35 представлен зафиксированный в процессе тестирования на стенде независимого института SP начальный перепад давления фильтра E10 - 31/38, равный 135 Па, а на Рис.4.36- тренд перепада давления при различных значениях расхода воздуха. Как видно из представленных данных в Табл.4.11, отклонение фактических значений

начального перепада давления на этих ФТО от паспортных значений составляет от 20 до 40%. Наименьшее различие между паспортными и фактическими значениями начального перепада давления зафиксированы для ФТО E11 - 31/38 (7,1%).



Рис.4.35. Начальный перепад давления фильтра E10-31/38, зафиксированный во время тестирования

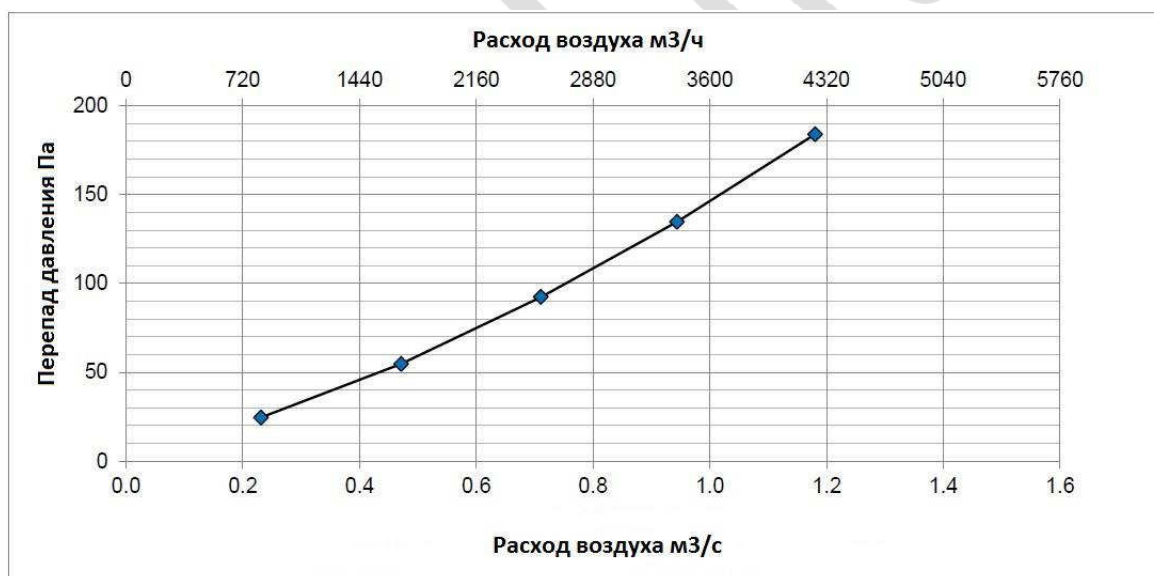


Рис.4.36. График изменения перепада давления на фильтре E10-31/38 от расхода воздуха

В паспортах фильтров, представленных дистрибьютором немецкой компании E, сказано, что герметичность стыков фильтровального материала с рамкой фильтра со стороны входа и выхода обеспечена. Однако, тест на водостойкость фильтр элемента E11-31/38, показал обратное. Течь воды произошла именно в этом месте через 2 мин 9 сек при заполнении V- секции фильтра до уровня 230 мм (Рис.4.37). Такая же картина наблюдалась и с ФТО F9-23, где течь воды через стык фильтровального материала с рамкой фильтра была зафиксирована через 26 секунд при уровне воды 45 мм.



Рис.4.37. Течь воды через стык фильтровального материала и рамки фильтра E11-31/38

На Web-site немецкого производителя фильтров представлены более реалистичные данные начального перепада давления. Там также нет классификации воздушных фильтров по энергоэффективности. Можно было бы предположить, что их российский представитель занимается поставкой продукции с некорректными техническими данными, не ставя в известность свой головной офис. Однако, на паспортах и результатах тестирования фильтров, представленных российским дистрибьютором этой компании, стоят печати головного иностранного офиса.

Зачем же идет умышленное занижение начального перепада давления на фильтр элементах? Методика определения победителя в открытых запросах предложения (ОЗП) тендерных процедур подготовлена таким образом, что чем больше разница между величиной начального перепада давления, заявленной поставщиком, и величиной, указанной в ТЗ на фильтры, тем большее количество баллов начисляется заявителю. Для подкрепления паспортных данных фильтров предоставляются результаты тестирования этих фильтр – элементов выполненные, не в независимых институтах или центрах, как требуется в ТЗ, а в собственных испытательных лабораториях. При этом, собственные лаборатории выдаются за независимые тестирующие центры, которые носят звучные названия - институт. Правда, в этом институте нет факультетов и кафедр, а профессорско - преподавательский состав был представлен только оператором этого испытательного стенда.

Чтобы у читателей не сформировалось мнение, что данная ситуация с начальным перепадом давления сложилась только для кассетных фильтров тонкой очистки этого поставщика, выполним сравнение рассматриваемого параметра фильтра грубой очистки класса G4 одного типа размера на Web-site производителя и в паспорте фильтра его

поставщика на отечественный рынок. На Web-site головного офиса величина начальным перепадом давления фильтра равна 55 Па, а в паспортах фильтров, представляемых их дистрибьютором, – фигурирует величина 45 Па. Занижение этого параметра в паспортах фильтров составляет 22,2%. Таким образом, искусственно расширяется диапазон работы фильтра на 10 Па (с 45 Па до 250 Па согласно ГОСТ 779-2014) и, тем самым, увеличивается срок его службы.

Для выполнения диспетчерского графика системного оператора и компенсации недовыработки электроэнергии ГТУ персоналу ТЭЦ придется увеличивать расход топливного газа. Потери отечественных электроэнергетических компаний от действий недобросовестных поставщиков продукции по занижению реальных значений начального перепада давления на фильтрах КВОУ ГТУ могут исчисляться сотнями миллионов рублей.

В этой ситуации уместно вспомнить слова таможенника Верещагина П.А (кинофильм «Белое солнце пустыни»), который ценой своей жизни отстаивал интересы страны:

«За Державу обидно!»

Резюме:

Принципиально выполненный входной контроль воздушных фильтров для КВОУ ГТУ является действенным средством по пресечению проникновения на стратегические объекты нашей страны некачественной и не энергоэффективной продукции, изготовленной недобросовестными иностранными производителями и отечественными дистрибьютерами в процессе локализации производства импортного оборудования в нашей стране.

Входной контроль должен выполнять роль таможни на границе энергетических объектов нашей страны.

4.9. Увеличение жизненного цикла финишных фильтров КВОУ ГТУ

При рассмотрении Общих правил (здравого смысла) выбора оптимальной системы фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ (§ 4.7), мы убедились, что тривиальный подход к повышению эффективности системы фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ только за счет повышения классов очистки фильтр элементов конечной (финишной) очистки КВОУ не всегда ведет к желаемому результату.

При использовании фильтров классов очистки E12 загрязнения проточной части ГТУ практически не происходит. Однако, сумма общих затрат, обусловленная ростом перепада давления, начинает расти.

Исходя из этого, необходимо найти оптимальное соотношение между эффективностью фильтра и перепадом давления, которое должно оцениваться в соответствии с техническими характеристиками ГТУ, параметрами окружающей среды и эксплуатационной нагрузкой.

В 2013 году шведская компания С проинформировала отечественного читателя о создании кассетных фильтров с тремя V-секциями глубиной 600 мм и площадью 50 м² [40]. По утверждению автора статьи, эти фильтры обеспечивают такую же степень очистки, что и фильтры глубиной 292 мм, без ограничения выходной мощности ГТУ. На Рис.4.38 представлен внешний вид фильтров компании С.



Рис.4.38. Кассетные фильтры шведской компании С глубиной: а, б- 292 мм, в- 600 мм

В табл.4.13 приведены технические характеристики кассетных фильтров шведской компании С классов очистки F8-E12 глубиной 600 мм.

Табл.4.13. Технические характеристики кассетных фильтров классов глубиной 600 мм [41]

Тип	EN779	EN1822	ISO 16890	Размеры (мм)	Расход воздуха, давление (м ³ /ч/Па)	Площадь фильтрации (м ²)	Вес (кг)
CamGT 3V 600-F8-Std	F8		ePM1 80%	592x592x600	4250/100	41	15
CamGT 3V 600-E10-Std		E10		592x592x600	4250/135	45	16
CAM GT 3V 600-F9-Std	F9		ePM1 85%	592x592x600	4250/115	38	15
CamGT 3V 600-E11-Std		E11		592x592x600	4250/140	48	16
CAM GT 3V 600-E12-Std		E12		592x592x600	4250/190	50	17

Как видно на рис.4.38в кассетные фильтры компании С глубиной 600 имеют мощную пластмассовую рамку и защитную решетку фильтровального материала. Фильтровальный материал изготовлен из стекловолокна с вертикальной укладкой внутри фильтра. Конечный перепад давления 600 Па. Давление на разрыв фильтра более 6250 Па. Фильтры предназначены для эксплуатации при температуре окружающей среды 70⁰ С и относительной влажности 100%. Предусмотрен дренаж атмосферной влаги в сторону грязного воздуха.

На рис.4.39. приведены графики изменения перепада давления на фильтрах 600 мм в зависимости от расхода воздуха.

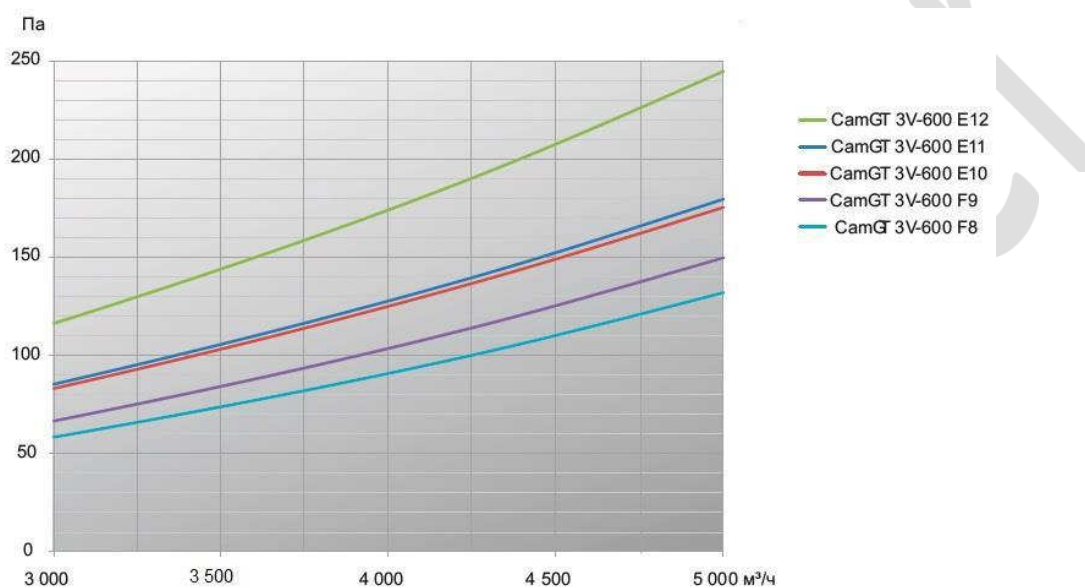


Рис.4.39. Графики перепада давления на фильтрах 600 мм в зависимости от расхода воздуха.

В 2021 году компания С сообщила, что осуществила оптимизацию системы фильтрации циклового воздуха ГТУ 44 МВт на электростанции итальянской компании Alto Garda (AG) Power [42]. Целью работы было снижение общего перепада давления в системе фильтрации, что предполагало достижение следующих целей:

- рост выходной мощности при том же расходе топлива;
- увеличение срока службы финишного фильтра, снижение временных и финансовых затрат для его замены;
- повышение уровня защиты ГТУ и доступности его обслуживания.

Электростанция расположена в прибрежной зоне, которая характеризуется частыми атмосферными осадками и туманом, со средней относительной влажностью воздуха 75%.

Первоначально на КБОУ ГТУ была установлена двухступенчатая система фильтрами с фильтром грубой очистки (ФГО) класса G4 и финишного фильтра F9. Эта система имела следующие недостатки:

- высокие скачки перепада давления в условиях повышенной влажности, что приводило к замене ФГО каждые 4 месяца;
- низкая эффективность фильтрации и отсутствие дренажных канавок для отвода влаги из фильтров на грязную сторону воздуха, что приводило к деградации двигателя.

После обследования местности, компанией С был предложен оптимальный вариант воздушных фильтров, состоящий из карманного фильтра класса F7 и воздушного фильтра CamGT 3V-600 класса E10.

Перед обновлением системы фильтрации перепад давления в среднем составлял 750 Па и в течение года требовалось 3 останова ГТУ для замены ФГО. Новая система фильтрации даже через 2 года эксплуатации поддерживает в среднем 375 Па. В результате срок службы фильтра предварительной фильтрации увеличился до одного года, без замены финишного фильтра. Благодаря снижению перепада давления, а также уменьшению загрязнения, AG Power сэкономит около 650 000 нм³ топлива. Кроме того, выбросы углекислого газа снизились на 1100 тонн в год.

Другим производителем кассетных фильтров с глубиной 600 мм является компания FAIST производитель ВЗТ и воздушных фильтр элементов для КБОУ ГТУ. В Табл. 4.14 представлена спецификация фильтров этих фильтров, имеющих обозначение FVXX [43].

Табл.4.14. Спецификация фильтров FVXX

Габаритные размеры, мм	592x592x600
Класс эффективности	F9 / E10 / E11 / E12 / H13
Номинальный расход воздуха, м ³ /ч	4250
Начальный перепад давления, Па	100 [F9] / 120 [E10] / 145 [E11] / 190 [E12]
Конечный перепад давления, Па	До 650
Макс. температура, °С	80
Вес, кг	17

Номинальная площадь	50 м ²
Тип материала	Водоотталкивающее микростекловолокно
Материал разделителей	Термоплавкий клей
Уплотнение	Пенополиуретан
Рамка	АБС
ASHRAE DHC	2000г при 650 Па
Давление на разрыв	>6250 Па

На Рис.4.40 приведена зависимость перепада давления на фильтрах серии FVXX от расхода воздуха.

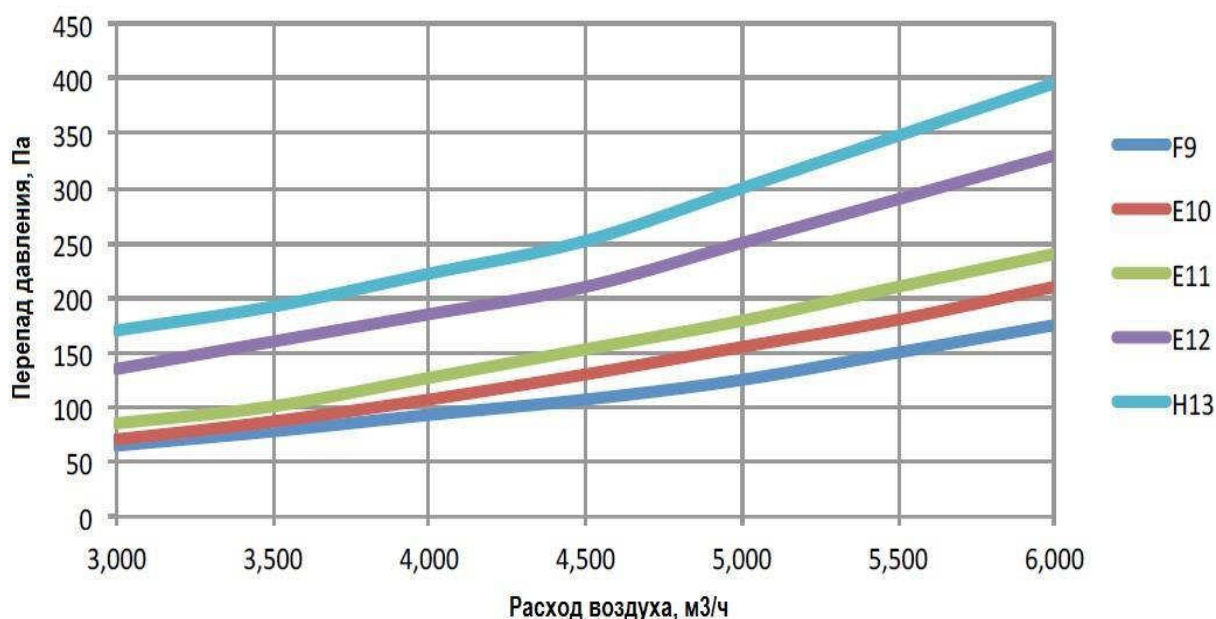


Рис.4.40. График зависимости перепада давления на фильтрах серии FVXX от расхода воздуха компании FAIST

В Табл.4.15 приведены значения начального перепада давления и пылеемкость кассетных фильтров класса E11 различной глубины [44].

Табл.4.15. Начальный перепад давления, пылеемкость и площадь фильтров класса E11 различной глубины компании FAIST

Фильтры	E11 (600 мм)	E11 (440 мм)	E11 (292 мм)
Начальный перепад давления при 3700 м ³ /ч, Па	120	160	220
ASHRAE DHC при 450 Па, г	1400	785	350
Площадь фильтрации, м ²	50	32	20

Сравнивая технические характеристики кассетных фильтров глубиной 600 мм шведской компании С и немецкой компании FAIST класса E11, приходим к выводу, что они практически идентичны (Табл. 4.13. и 4.15). Заметное отличие в пользу компании FAIST состоит в большей площади фильтрации (2м²).

Опираясь на полученные результаты по определению пылезадерживающей способности фильтров, полученные в испытательной лаборатории, компания FAIST с уверенностью утверждает, что фильтр со значительно более высокой пылезадерживающей способностью обеспечит более длительный срок службы (если только фильтрующий материал не сильно отличается).

Исходя из опыта работы на различных объектах, компания FAIST делает вывод, что приведенные на Рис.4.41 показатели срока службы фильтров справедливы:

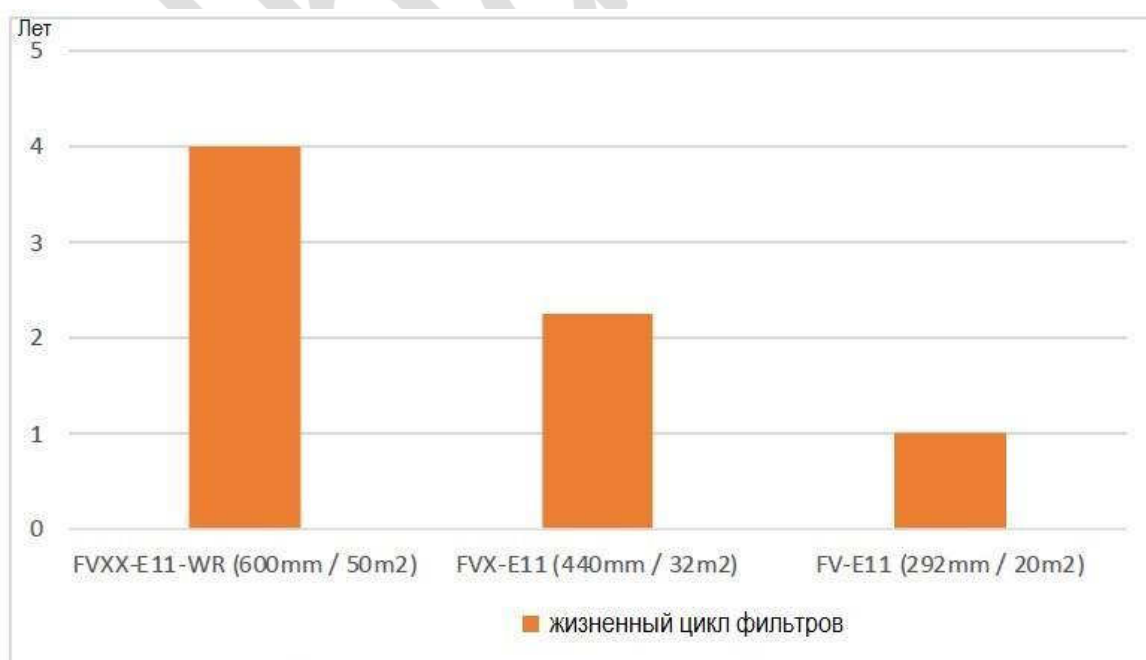


Рис.4.41. Прогноз срока службы воздушных фильтров класса E11 различной глубины

В качестве успешного применения кассетных фильтров класса E11 глубиной 600 мм приводится пример улучшения системы фильтрации КВОУ ГТУ на электростанции в Марчвуде (Великобритания).

Первоначально, в 2012 году, там была установлена двухступенчатая система фильтрации, состоящая из фильтра класса M6, изготовленного по технологии Drop Safe, и финишных фильтров FVX-E11-WR (440 мм) компании FAIST (Рис.4.41а). В сентябре 2015 года FAIST усовершенствовала систему, оснастив её фильтрами FVXX-E11-WR (600 мм) с теми же фильтрами первой ступени (Рис.4.41б).



Рис.4.42. Система фильтрации компании FAIST: а- старая; б-новая с фильтрами 600 мм

Известно, что фильтры, изготовленные по технологии Drop Safe, являются лучшими коагуляторами атмосферной влаги на сегодняшний день. Кассетные фильтры серии FVXX, как и все другие кассетные фильтры компании FAIST, снабжены прочными защитными решетками и выдерживают давление на разрыв более 6250 Па.

В результате установки новых ФТО класса E11 с глубиной 600 мм снизилась амплитуда колебаний перепада давления, отмечаемая на старой системе фильтрации с более короткими финишными фильтрами (желтая пунктирная линия) (Рис.4.43).

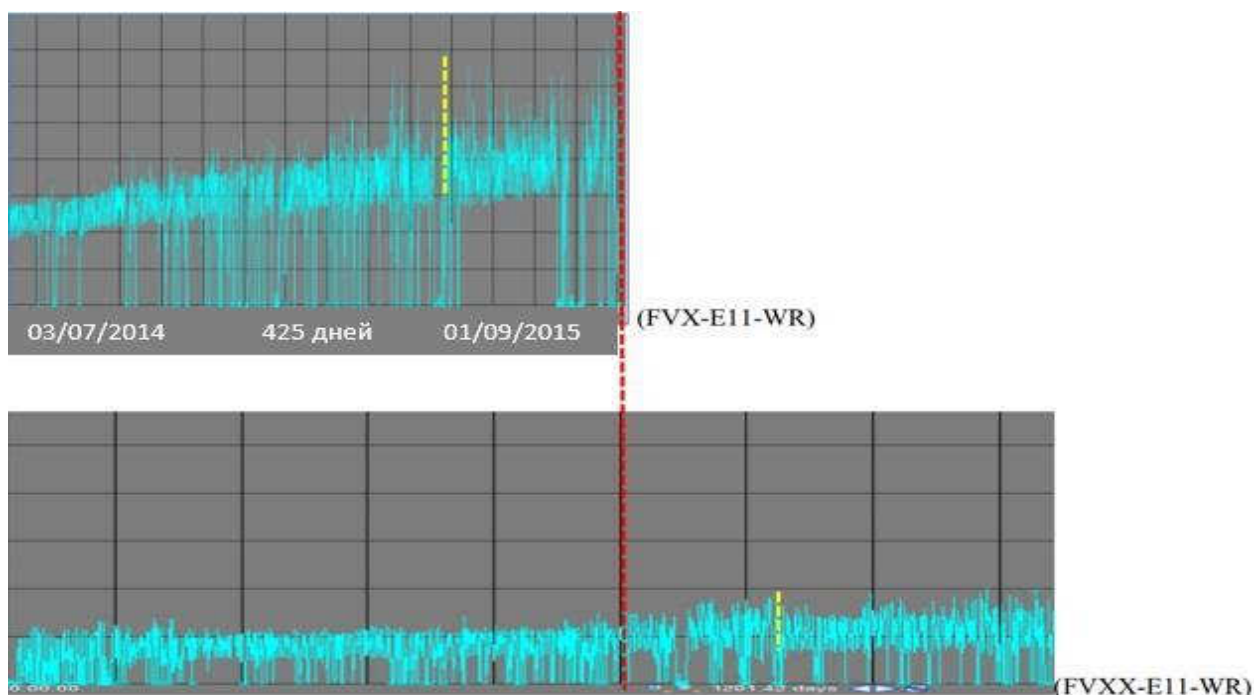


Рис.4.43. Сравнение колебаний перепада давления на старой и новой системе фильтрации

Увеличился жизненный цикл системы фильтрации циклового воздуха энергетической ГТУ, снизились затраты на закупку фильтров, увеличилась выработка электроэнергии.

В информационном письме от 02.10.2021 компания Siemens Energy [45] информирует потребителей воздушных фильтров компании FAIST, что в условиях высокой запыленности, таких как Бангладеш, Пакистан, Египет, Нигерия, ОАЭ и аналогичных странах, **рекомендуется** использовать фильтрующие элементы с наибольшей глубиной и площадью поверхности. В особенности, это относится к классу ЕРА.

За счет максимальной пылезадерживающей способности эти фильтры обеспечивают более длительный срок службы, меньший и более стабильный перепад давления и более эффективную фильтрацию по сравнению с фильтрами меньшей глубины.

(Примечание: При дооснащении оператор должен убедиться, что дополнительный вес и изгибающий момент фильтров с большим осевым размером – до 20 кг при загрузке на глубину 600 мм - приемлемы для удерживающих рам КВОУ).

Таким образом, всемирно известным производителем ГТУ рекомендовано использование кассетных фильтров класса Е глубиной 600 мм при одном ограничении – вес фильтра не должен превышать 20 кг.

Вес кассетных фильтров шведской компании С и немецкой FAIST класса Е не превышают этого ограничения и составляет 17 кг.

Третьим производителем воздушных кассетных фильтров глубиной 600 мм является турецкая компания М. В линейку изготавливаемых фильтров серии MVZ входят фильтр элементы класса F9, E10 и E12 (Рис.4.44).

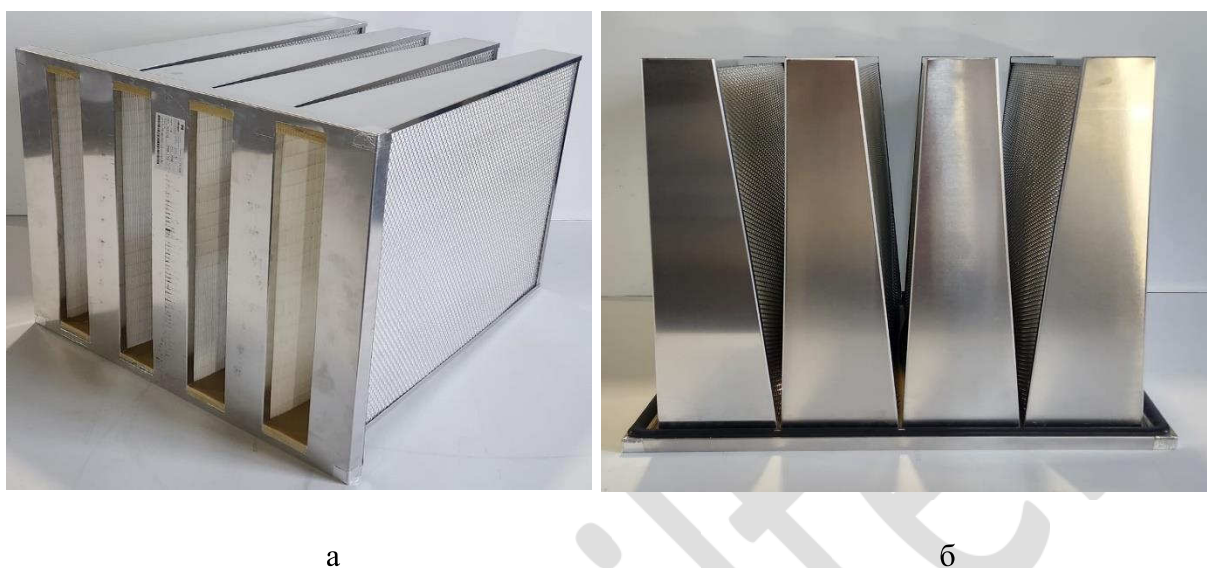


Рис.4.44. Внешний вид фильтров глубиной 600 мм компании М [46]

Особенностью этих фильтров, от рассмотренных ранее, является то, что рамка фильтров изготавливается из алюминия (Рис.44а). Фильтровальный материал на чистой стороне фильтров защищен алюминиевой решеткой (Рис.4.44б). В связи с этим вес фильтров этой серии составляет порядка 20 кг, что, в принципе, соответствует требованиям компании Siemens Energy. Однако, мы убеждены, что финишные фильтры КВОУ энергетических ГТУ не должны содержать металлических изделий в своей конструкции. Поэтому использование таких фильтров в электроэнергетике не целесообразно, несмотря на то, что давление на разрыв превышает 6000 Па. Эти фильтры целесообразно применять в воздухоочистительных устройствах не роторных механизмов, эксплуатируемых в морских и прибрежных зонах с высоким уровнем агрессивного воздействия морской воды и соли. Технические характеристики фильтров приведены в Табл.4.16 [46].

Табл.4.16. Технические характеристики фильтров серии MVZ

Класс	Ширина (мм)	Высота (мм)	Глубина (мм)	Площадь материала (м ²)	Расход воздуха (м ³ /ч)	Перепад давления (Па)
F9	592	592	600	48	5000	145
E10	592	592	600	48	5000	175
E12	592	592	600	48	5000	250

Зависимость перепада давления воздушных фильтров серии MVZ компании M в зависимости от расхода воздуха представлены на Рис.4.45 [46].

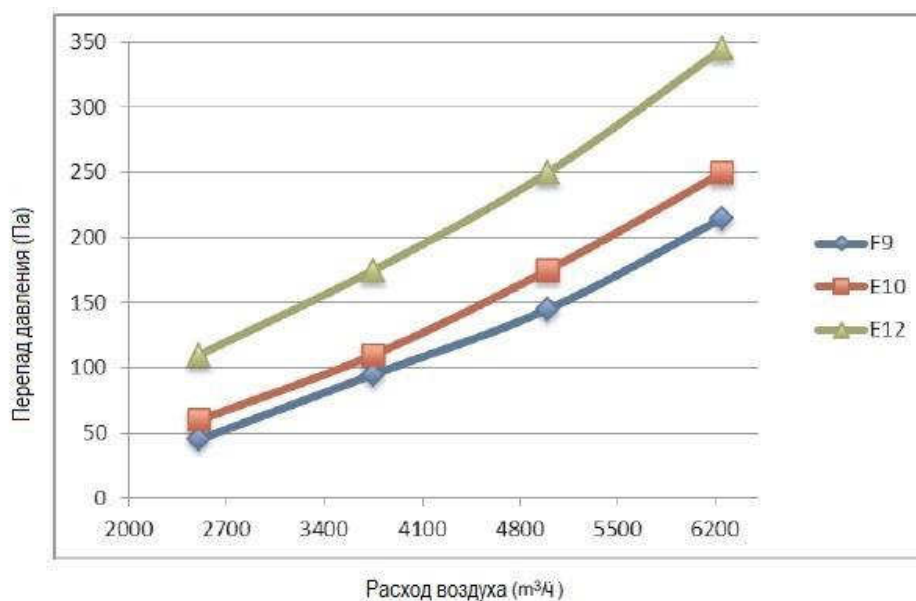


Рис.4.45. График зависимости перепада давления от расхода воздуха фильтров серии MVZ

Для выбора той или иной системы фильтрации циклового воздуха энергетической ГТУ необходимо выполнить сравнительный анализ всех затрат в течение срока эксплуатации в конкретных климатических условиях.

4.10. Выбор системы фильтрации циклового воздуха энергетической ГТУ

При закупке воздушных фильтров для очистки циклового воздуха ГТУ персонал энергетических компаний постоянно задается одним и тем же вопросом: **Как определить реальную экономическую эффективность применения того или иного фильтр элемента из многообразия продукции предлагаемой различными производителями?**

Зачастую для проведения технико-экономического обоснования или для оценки срока окупаемости используют лишь такой показатель, как первоначальная стоимость фильтр элементов, не принимая во внимание, что эта цена составляет лишь несколько процентов от всей суммы затрат, которые несет заказчик от момента приобретения до их утилизации. Только суммарные затраты в течение жизненного цикла (LCC - Life Cycle Costing) являются определяющими для выбора любого оборудования. Вполне возможно, что более дешевое на момент закупки оборудование в процессе эксплуатации окажется гораздо дороже первоначально дорогого, но более эффективного и надежного аналога.

В соответствии с ГОСТ Р 53791-2010 Жизненный Цикл Продукции (ЖЦП)- это

совокупность взаимосвязанных процессов изменения состояния продукции при ее создании, использовании (эксплуатации) и ликвидации (с избавлением от отходов путем их утилизации и/или удаления) [47]. Кроме технических причин, решение выбрать какую-либо конфигурацию системы фильтрации циклового воздуха ГТУ основывается на экономических факторах.

Метод LCC позволяет выявить и сократить ненужные и дублирующие функции. В настоящий момент именно уменьшение затрат жизненного цикла и определяет основные тенденции развития оборудования.

Выполним сравнительный анализ стоимости жизненного цикла базовой системы очистки циклового воздуха ГТУ (Табл.4.17), устанавливаемой в КВОУ и новой системы, в состав которой входят фильтры повышенного класса очистки E10 и площади фильтрации с глубиной фильтра 600 мм [48].

Табл.4.17. Характеристики фильтров базовой системы очистки циклового воздуха ГТУ

Фильтры	G4 панельный	G4 карманный	F8 кассетный
Количество фильтров	540	537	537
Материал	синтетика	синтетика	стекловолокно
Размеры, мм	592 x 592 x 96	592 x 592 x 200	592 x 592 x 300
Площадь фильтрации, м ²	2	1,5	20,0
Расход воздуха, м ³ /ч	3400	3400	3400
Начальный ΔP, Па	58/68*	40	90
Конечный ΔP, Па	450	250	450

*фактическое значение

Перед выполнением расчетов все фильтр-элементы базовой и новой системы фильтрации были подвергнуты тестированию на стендах специализированной лаборатории с целью определения фактических значений начального перепада и эффективности. В процессе тестирования фильтр элементов базовой системы очистки воздуха на испытательном стенде фирмы Toras, было установлено, что начальный перепад давления на панельном фильтре первой ступени на 10 Па выше, чем было заявлено в паспорте партии фильтров (см. Табл.4.17).

В бюллетене компании Siemens “Improvement of Air Inlet Filter Efficiency“ о совершенствовании эффективности воздушных фильтров ГТУ представлена оценка проникновения пыли промышленной зоны в проточную часть компрессора ГТУ через систему фильтрации с различной комбинацией классов очистки [24].

Используем этот метод для оценки проникновения частиц пыли в проточную часть ГТУ

применительно к анализам воздуха, взятым на всасе КВОУ с базовой системой фильтрации. Мониторинг окружающей среды показал, что по уровню загрязнения воздуха данный регион относится к сельскохозяйственной зоне. Результаты расчетов проникновения частиц пыли в проточную часть ГТУ приведены в Табл.4.18.

Табл.4.18. Расчет проникновения частиц в проточную часть ГТУ при работе в климатических условиях сельскохозяйственной зоны

Размер частиц, мкм	Количество частиц в м ³ атмосферного воздуха с/х	Базовая система фильтрации G4 + G4 + F8		Новая система фильтрации G4 + M6 + E10	
		Средняя эффективность ФТО, Е _М %	Количество проникших частиц в м ³	Средняя эффективность ФТО, Е _М %	Количество проникших частиц в м ³
0,3-0,5	12 278 382	88,2	1 335 217	98,5	34 653
0,5-1,0	1 267 177	94,2	55 953	99,5	614
1,0-3,0	310 022	97,55	4 622	99,99	31

С целью повышения эффективности системы фильтрации предлагается повысить класс очистки ФГО до класса М6, а ФТО до Е10. Результаты оценки эффективности трехступенчатой системы фильтрации воздуха КВОУ по схеме G4 + M6 + E10 представлены в Табл.4.18.

В случае применения данной системы очистки атмосферного воздуха, количество частиц размером 0,3-0,5 мкм, проникающих в проточную часть ГТУ, может снизиться в 38,5 раз по сравнению с базовой системой фильтрации. При этом общее количество частиц, поступающих в ГТУ уменьшится примерно в 40 раз, что позволит отказаться от On-line промывок осевого компрессора.

Однако, благоприятные условия загрязнения окружающей среды не должны ложиться в основу выводов о целесообразности использования той или иной системы фильтрации циклового воздуха ГТУ. Ряд ТЭЦ и ГРЭС имеют еще старые очереди, которые работают на угле. Наиболее интенсивное загрязнение фильтров КВОУ происходит в то время, когда осуществляется его разгрузка из вагонов и старые очереди начинают работать на угле, загрязняя окружающую среду. Кроме того, не надо забывать о таких природных явлениях как пожары, которые случаются при высокой температуре атмосферного воздуха в летние периоды времени.

Для оценки эффективности новой системы фильтрации в случае эксплуатации в сложных климатических условиях, нами были использованы результаты замеров

атмосферного воздуха, сделанные в городе Москва в 2010 году, в то время, когда горели торф и леса Московской области [49].

Наибольший перепад давления в этот период времени наблюдался на фильтрах тонкой очистки, замена которых при работающих ГТУ не предусмотрена. Высокая загрязненность атмосферного воздуха приводила к аварийным остановам ГТУ, снижению диспетчерского графика электрической нагрузки и существенным экономическим потерям.

В связи с высокой запыленностью воздуха и резким перепадом давления на фильтрах КВОУ пришлось принудительно останавливать ГТУ для замены фильтров, остальные двигатели были переведены на пониженные режимы работы. В результате был снижен диспетчерский график электрической нагрузки. Кроме того, остро стал вопрос наличия запасных комплектов для КВОУ, поскольку замена фильтров за небольшой промежуток времени была выполнена несколько раз.

Результаты замеров загрязненности воздуха во время пожаров в г. Москве в 2010 году и расчетов проникновения пыли в проточную часть компрессора ГТУ в этих условиях для двух систем фильтрации представлены в Табл.4.19.

Табл.4.19. Расчет проникновения частиц в проточную часть ГТУ при работе в экстремальных климатических условиях (пожары)

Размер частиц, мкм	Количество частиц в м ³ атмосферного воздуха город Москва 12.08.2010	Базовая система фильтрации G4 + G4 + F8		Новая система фильтрации G4 + M6 + E10	
		Средняя эффективность ФТО, Ем %	Количество проникших частиц в м ³ ,	Средняя эффективность ФТО, Ем %	Количество проникших частиц в м ³
0,3-0,5	249 456 816	88,2	27 128 041	98,5	704 053
0,5-1,0	32 140 306	94,2	1 419 159	99,5	15 572
1,0-3,0	1 526 576	97,55	37 401	99,99	153

Очевидно, что при таких условиях окружающей среды базовая система фильтрации воздуха является малоэффективной. Количество пыли, поступающее в проточную часть ГТУ при таких климатических условиях через обе системы фильтрации, в 20 раз превысило аналогичный показатель при климатических условиях, зафиксированных нами во время мониторинга окружающей среды на всасе КВОУ в обычных условиях. Безусловно, это повлечет за собой интенсивное загрязнение проточной части компрессора и снижение выработки электроэнергии ГТУ.

Несмотря на экстремальные условия запыленности атмосферного воздуха, количество частиц, поступивших в проточную часть ГТУ через новую систему фильтрации на 90% ниже, чем у базовой системы фильтрации при существующих климатических условиях сельскохозяйственной местности.

В качестве фильтров первой (коагуляторов) и второй ступени альтернативной системы фильтрации циклового воздуха ГТУ в расчетах приняты фильтры шведской компании С класса G4 и M6. Они позволяют продлить срок службы фильтров тонкой очистки ввиду низкого начального перепада давления и высокой пылеемкости. Благодаря гофрированным сепараторам и прочной конструкции, фильтр особенно эффективен (по мнению производителя) в условиях повышенной влажности. Конструкция фильтра позволяет установить его непосредственно перед фильтром тонкой очистки.

В качестве фильтра тонкой (финишной) очистки принят фильтр элемент серии 3V-600 класса очистки E10, глубиной 600 мм и увеличенной поверхностью фильтрации 45,3 м² (Табл.4.20).

Табл.4.20. Расчет срока службы фильтров системы очистки циклового воздуха ГТУ при эксплуатации в различных климатических условиях

Фильтры	G4	M6	3V-600 E10
Количество фильтров	540	537	537
Материал	синтетика	стекловолокно	стекловолокно
Размеры, мм	592 x 592 x 98	588 x 588 x 129	592 x 592 x 600
Площадь фильтрации, м ²	2,5	11,8	45,3
Расход воздуха, м ³ /ч	3727	3747,8	3747,8
Начальный ΔP, Па	63	93	118
Конечный ΔP, Па	400	450	128/219*
Срок службы фильтра, ч	18 000/3 900	36 500/7 800	43 700/43 700
Количество замен фильтров за 3 года	1,5 /6,8	0,8 /3,4	0,6/0,6
Сервисных остановок	0	0	0
Количество Off-line промывок ГТУ за 3 года**	3		

*400 Па+450 Па+219 Па = 1288 Па, что не превышает уставку по срабатыванию предупредительной сигнализации о достижении перепада давления на КВОУ в 1300 Па.

** Ежегодная Off-line промывка осуществляется по рекомендации производителя ГТУ.

Выбор финального фильтра для КВОУ с такой эффективностью и габаритными размерами был обусловлен опытом эксплуатации ГТУ в условиях пожаров в г. Москве в 2010 году, когда в первую очередь выходили из строя фильтры тонкой очистки класса F8-

F9 глубиной 300 мм.

Тестирование нового фильтр элемента серии 3V-600 было выполнено лабораторией независимого института S&P (Швеция). Результаты теста полностью подтвердили технические характеристики, приведенные в паспорте фильтра. Запатентованная конструкция фильтра обеспечивает его оптимальные эксплуатационные характеристики, низкий перепад давления и увеличенный срок службы.

В следствие использования новых фильтр - элементов площадь фильтрации альтернативной системы очистки циклового воздуха ГТУ ($59,6 \text{ м}^2$) увеличена по сравнению с базовой на $36,1 \text{ м}^2$, т.е. более чем в 2,5 раза.

Как показал, выполненный нами мониторинг окружающей среды в различных климатических условиях количество пыли на всасе КВОУ варьируется в широком диапазоне. Для оценки жизненного цикла (ЖЦ) базовой и новой систем фильтрации КВОУ ГТУ нами было выполнено два расчета: для условий сельскохозяйственной местности и экстремальных внешних условий (лесных пожаров). Для расчета предельный перепад давления на фильтре коагуляторе класса G4 был задан в 400 Па (при предельно-допустимом значении в 450 Па), а для фильтра средней очистки (ФСО) М6 - 450 Па. Жизненный цикл предложенной системы фильтрации рассчитывался в течение трех лет эксплуатации ГТУ.

На Рис.4.46А и Табл.4.20 (черный цвет) представлены результаты расчета ЖЦ фильтров первой, второй и третьей ступени новой системы очистки циклового воздуха ГТУ для условий сельской местности. По оси ординат Рис.4.46– перепад давления на фильтрах, по оси абсцисс – часы работы до замены фильтров. Из представленных расчетов видно, что фильтр коагулятор класса G4 в этих условиях может меняться 2 раза за 3 года эксплуатации, ФСО класса М6 раз в 3,75 года, а фильтр тонкой очистки 3V-600 класса E10 раз в 5 лет. При этом перепад давления на ФТО достигнет величины всего в 128 Па, поэтому его замена будет обусловлена прочностными свойствами прокладок и другими факторами. Количество промывок ГТУ в режиме Off-line одна в год (по рекомендации производителя ГТУ), промывки On-line не требуются.

На Рис.4.46Б и Табл.4.20 (коричневый цвет) представлены результаты расчета ЖЦ фильтров первой, второй и третьей ступени новой системы очистки циклового воздуха ГТУ для случая экстремальных внешних условий. В данном случае жизненный цикл фильтра коагулятора класса G4 ограничился 3900 часами и потребуются две замены фильтров в году. Срок службы ФСО М6 составил 7800 часов, что меньше обычной наработки ГТУ в течение года. Срок службы фильтра тонкой очистки 3V-600 класса E10 и

количество его замен останется неизменным. Это очень важный показатель, поскольку стоимость фильтра 3V-600 E10 в несколько раз выше фильтров предварительной очистки. Следует отметить, что суммарный перепад давления на фильтрах новой системы очистки циклового воздуха достиг 1288 Па, что не превышает уставку по срабатыванию предупредительной сигнализации о достижении перепада давления на КВОУ в 1300 Па.

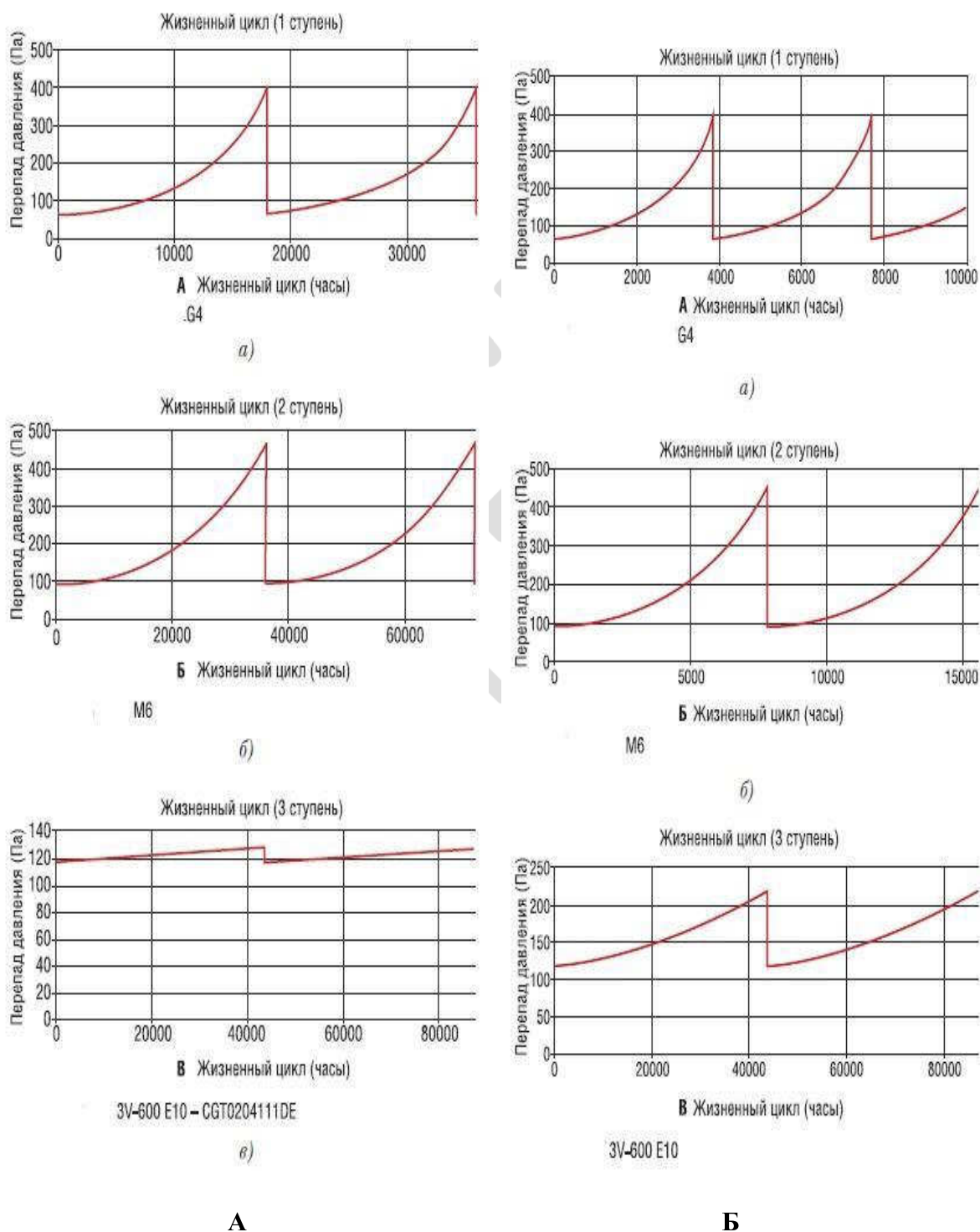


Рис.4.46. График жизненного цикла фильтров первой класса G4, второй ступени класса

М6 и третьей ступени 3V-600 новой системы очистки циклового воздуха ГТУ для условий: А- сельской местности, Б-в экстремальных условиях (пожаров)

Опираясь на результаты мониторинга атмосферного воздуха, данные расчета проникновения пыли в проточную часть компрессора ГТУ через систему фильтрации атмосферного воздуха в КВОУ с различной комбинацией классов очистки и оценку жизненного цикла фильтров по методике расчета эксплуатационных затрат на систему фильтрации циклового воздуха, промывку компрессора и недовыработку мощности ГТУ [50] можно выполнить сравнительный анализ годовых затрат базовой системы фильтрации с альтернативной системой при двух вариантах атмосферных условий.

Затраты, связанные с эксплуатацией базовой системы фильтрации циклового воздуха ГТУ, приняты за 1 (100%). В результате применения новой системы фильтрации очистки циклового воздуха ГТУ можно достигнуть снижения затрат на промывку проточной части осевого компрессора на 96,2% при двух вариантах климатических условий. Потери выработки электроэнергии, вызванные загрязнением проточной части ГТУ в сельской зоне, снижаются на 97,5%, а общие затраты на 92,2 %. Следует отметить, что при этих результатах затраты, обусловленные закупкой комплекта фильтров для КВОУ для новой системы фильтрации на 62,5% ниже базовой системы фильтрации. Даже в экстремальных условиях эксплуатации ГТУ при росте затрат связанные с увеличением перепада давления на фильтрах КВОУ, суммарные затраты на новую систему очистки циклового воздуха будут ниже затрат на базовую систему фильтрации на 37,3%.

Выполненные расчеты, по предложенной методике оценки затрат, отчетливо показывают преимущество новой системы фильтрации циклового воздуха ГТУ по сравнению с базовой системой.

Резюме:

1. Выбор оптимальной системы фильтрации циклового воздуха необходимо производить на основании расчетов затрат в течение жизненного цикла фильтр-элементов.
2. Для получения корректных результатов расчетов затрат необходимо использовать не паспортные данные рассматриваемых фильтров, а данные тестирования этих фильтр элементов в лабораториях независимых институтов.
3. Использование финишных фильтров тонкой очистки класса Е с глубиной 600 мм позволит увеличить площадь фильтрации и срок службы, по сравнению с типоразмерами фильтр элементов меньших размеров.

4.11. Технические требования к воздушным фильтрам КВОУ энергетических ГТУ

В главе 1 книги мы подробно рассмотрели и проанализировали существующие и планируемые к введению в действие зарубежные стандарты и отечественные ГОСТ. Мы обратили внимание на парадоксальную ситуацию с отечественным ГОСТ Р ЕН 779-2014, первоисточник, которого европейский стандарт EN 779:2012 отменен. В тоже время отечественный стандарт действует и по его требованиям поставляются воздушные фильтры на КВОУ энергетических ГТУ, хотя ГОСТ классифицирует фильтр элементы общей вентиляции.

От нашего внимания не ускользнул тот факт, что во введенном стандарте ISO 16890 (ГОСТ Р 70064-2022) предельно – допустимый перепад давления на фильтрах снижен, по сравнению с ГОСТ Р ЕН 779-2014, а в ГОСТ Р 58499-2019 наоборот, увеличен.

В настоящее время некоторые компании повысили предельно допустимый перепад давления на собственных фильтрах: для фильтров грубой очистки классов G – 450 Па, для фильтров тонкой очистки классов F – 600 Па, хотя согласно действующему в России ГОСТ Р ЕН 779-2014 эти показатели равны 250 и 450 Па соответственно.

Авторы показали случаи занижения начального перепада давления на воздушных фильтр элементах отдельных западных производителей в целях искусственно расширить диапазон и срок их службы. Теперь у таких компаний появляется дополнительная возможность делать то же самое, но уже в сторону увеличения этого значения, опираясь на новый официальный ГОСТ Р 58499-2019.

Также было зафиксировано, что на отечественный рынок поступает большое количество фильтров, перепад давления на которых в процессе эксплуатации практически не растет. Поставщики такой продукции провозглашают это свойство своих фильтров как новые технологии в теории и практике фильтрации воздуха. По уверению этих производителей их фильтры могут работать многие годы без замены, поскольку критерием для замены фильтров, согласно действующему ГОСТ, является предельно допустимый перепад давления. При проведении мониторинга загрязненности воздуха на всасе КВОУ ГТУ авторы выявили многочисленные факты того, что фильтры этих поставщиков не относятся к новым достижениям в науке и технике, а тривиально пропускают накопленную пыль.

В § 4.3 мы рассмотрели ситуацию, когда в ГОСТ Р ЕН 779-2014 и ГОСТ Р 70064-2022 (ISO 16890-2016) отсутствует критерий, лимитирующий “отделение” частиц от воздушных фильтров (увеличение количества и концентрации частиц в воздухе за фильтром по сравнению с этими параметрами на его входе). Физическая сущность этого

процесса сводится к уменьшению эффективности очистки ниже нуля. Поэтому авторы взяли на себя смелость, назвав это явление отрицательной эффективностью.

Другими словами, наступает правовая неопределенность в этих вопросах. Главное свойство неопределенной нормы – именно неясность поведения в конкретной социальной ситуации, которая порождает и другую проблему – отсутствие критерия правомерного поведения [51].

Во всех рассмотренных зарубежных стандартах и отечественных ГОСТ уточняется, что характеристики атмосферной пыли значительно отличаются от таковых для контрольного аэрозоля, используемого при испытаниях. В связи с этим по результатам испытаний трудно судить об эксплуатационных характеристиках фильтров и их сроке службы. Таким образом, всех пользователей этой продукции предупредили, что характеристики воздушных фильтров, которые были приобретены, в реальных условиях эксплуатации могут не соответствовать заявленным производителями классам очистки (эффективности). Кроме того, следует добавить, что и климатические испытания воздушных фильтров в лабораторных условиях существенно отличаются от реальных условий их эксплуатации по температуре атмосферного воздуха, влажности, виду атмосферных осадков (дождь, снег). Например, согласно ISO 16890 (ГОСТ Р 70064-2022) температура воздуха в объекте испытаний должна составлять (23 ± 5) °С с относительной влажностью (45 ± 10) %. Так, в климатической зоне Москвы («У») в течение года температура воздуха может изменяться в диапазоне от -45°C до $+40^{\circ}\text{C}$, а относительная влажность достигать 100%.

Какие же требования предъявляются к воздушным фильтрам для общей вентиляции этими стандартами?

Общие требования:

- фильтрующий элемент должен быть спроектирован или маркирован по направлению потока воздуха таким образом, чтобы предотвратить неправильный монтаж;
- фильтр должен быть спроектирован таким образом, чтобы не возникла утечка вдоль уплотнительной кромки при правильном монтаже в вентиляционном канале.

Требования к материалу:

- фильтрующий элемент должен быть изготовлен из подходящего материала, чтобы выдерживать нормальное использование и воздействие температуры, влажности и коррозионной среды, при которых ему предстоит работать;
- фильтрующий элемент должен быть спроектирован таким образом, чтобы выдерживать механические напряжения, которые могут возникать при нормальном использовании.

Как видно из представленного перечня, это общие требования, которые могут быть применимы для любых технических средств.

Реальные условия эксплуатации оборудования и требования к его исполнению определяются ГОСТ 15150-69 в редакции изменений (изменение № 1, утвержденное в январе 1978 г., изменение № 2, утвержденное в декабре 1982 г., изменение № 3, утвержденное в октябре 1988 г., изменение № 4, утвержденное в сентябре 1999 г., изменение № 5, введенное в действие приказом Росстандарта от 27.11.2012 № 1231-ст.) [32]. Настоящий стандарт распространяется на все виды машин, приборов и других технических изделий (далее – изделия) и устанавливает макроклиматическое районирование земного шара, исполнения, категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования изделий в части воздействия климатических факторов внешней среды. Все требования настоящего стандарта являются обязательными (за исключением рекомендуемых или допускаемых требований) как относящиеся к требованиям безопасности.

Мы задали читателям простой, но очень важный вопрос: почему на энергетических объектах используются воздушные фильтры для общей вентиляции? Разве технические требования, предъявляемые к таким фильтрам, сопоставимы с требованиями к энергетическому оборудованию, используемому на стратегических объектах, как электростанции?

Ответ на заданный вопрос очевиден: настало время создания нового российского ГОСТ для воздушных фильтров КВОУ энергетических ГТУ, учитывающего реальные климатические условия эксплуатации, повышенные требования к конструкции и эффективности этой продукции. Такая попытка была предпринята нами более 16 лет назад.

В 2007 г. в ОАО РАО «ЕЭС России» были приняты и утверждены «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок» [52]. Однако вскоре после распада ОАО РАО «ЕЭС России» контроль за выполнением этих требований перестал существовать. По прошествии 16 лет с момента создания этого документа можно констатировать, что заложенные в нем основные положения являются актуальными и в настоящее время. Уже тогда авторы предлагали использовать в системах фильтрации циклового воздуха ГТУ НЕРА фильтры с классом очистки Н10–Н12 (в настоящее время это Е10–Е12). И только недавно в КВОУ ГТУ отечественных энергетических компаний начали устанавливать эффективные фильтры такого класса.

Поэтому считаем целесообразным использовать ранее выполненные наработки в этом вопросе [52] с учетом новых технологий для создания технических требований к

воздушным фильтрам для КВОУ ГТУ. При выработке технических требований к этим фильтрам будем опираться на требования к условиям эксплуатации оборудования и его исполнению, изложенные в ГОСТ [32] и требования (рекомендации) производителей КВОУ и ГТУ. Важно не только провозгласить те или иные требования, но и обосновать их необходимость и определить для них критерии. Для этого необходимо опираться на требования к чистоте воздуха производителей ГТУ и параметрам уставок автоматической системы управления турбомашин по перепаду давления на фильтрах КВОУ [53].

Перепад давления на фильтрах КВОУ

Начальный перепад давления

Согласно исследованиям Eurovent Certification Company (ECC), чем меньше начальный перепад давления фильтр-элемента, тем большей энергоэффективностью он обладает (см. § 4.1). Кроме того, должен увеличиваться жизненный цикл фильтра до достижения предельно допустимого перепада давления. Влияние энергоэффективности воздушных фильтров на выработку электроэнергии газотурбинных установок может являться ориентиром для инженеров отечественных ТЭС при выборе фильтр элементов. Кроме того, необходимо помнить, что увеличение перепада давления на фильтрах КВОУ на 50 Па приводит в среднем к снижению выработки электроэнергии ГТУ на 0.1%

Значение начального перепада давления напрямую связано с расходом воздуха. В рассмотренных стандартах тестирование фильтр элементов осуществляется при расходе воздуха 3400 м³/ч. Энергетики должны ориентироваться на расход воздуха через КВОУ и ГТУ. На некоторых КВОУ количество фильтров на первой ступени больше, чем на остальных. Следовательно, расход воздуха через них будет меньше, чем на последующих ступенях. Это очень важный фактор, который надо учитывать при подготовке технического задания и заказе фильтров для КВОУ ГТУ. Таким образом, в одном и том же КВОУ могут быть установлены фильтр элементы с разным расходом воздуха. Исходя из этого, должен устанавливаться начальный перепад давления. Обычно воздушные фильтры изготавливаются для двух расходов воздуха: 3400 и 4250 м³/ч. Естественно, что чем выше расход воздуха через фильтр элемент, тем больший начальный перепад давления будет ему соответствовать.

Компания Siemens AG в своем бюллетене [38] назначает следующие начальные перепада давления для фильтров КВОУ своих ГТУ:

- фильтры-коагуляторы – менее 80 Па;
- фильтры грубой очистки – менее 80 Па;

- фильтры тонкой очистки (ФТО) группы F – менее 100 Па.

Эти перепады давления должны соответствовать расходу воздуха через фильтр-элемент в КВОУ около 3700 м³/ч. Для эффективных фильтров класса E (E10–E12) начальный перепад давления может превышать 100 Па. Целесообразно принять эти значения начального перепада давления фильтров за основу для воздушных фильтров для роторных машин согласно ГОСТ Р 58499-2019.

Для климатических условий эксплуатации с повышенной влажностью атмосферного воздуха целесообразно применять кассетные фильтр-элементы с вертикальной, а не горизонтальной укладкой фильтровального материала или с использованием мембранной технологии. В этом случае начальный перепад давления на фильтрах может отличаться от приведенных выше значений.

Конечный перепад давления

Для большинства энергетических ГТУ уставка предупредительной сигнализации по предельному перепаду давления составляет 1300 Па и по останову 1600 Па. Для самой большой и единственной в нашей стране ГТУ GE 9HA.01, работающей в Казане, эти показатели равны 1500 и 2000 Па соответственно. Если производители воздушных фильтров будут устанавливать предельный перепад давления по ГОСТ Р 58499-2019, то суммарный перепад давления для трехступенчатой системы очистки циклового воздуха ГТУ составит 1625 (375+625+625) Па (выше величин уставок).

Понятно, что такой подход неприемлем энергетическим компаниям с ГТУ, как по техническим, так и по экономическим соображениям. Поэтому, несмотря на рекомендации производителей воздушных фильтров, энергетические компании сами должны назначать предельные перепады давления для фильтров каждой из ступеней фильтрации циклового воздуха, исходя из ограничительных характеристик ГТУ.

Авторы считают целесообразным определить для трехступенчатой системы фильтрации для энергетических ГТУ с уставками предупредительной сигнализации по предельному перепаду давления 1300 и по останову 1600 Па следующие предельные перепады давления:

- первая ступень – 250 Па;
- вторая ступень – 450 Па;
- третья ступень – 450 Па.

Тогда суммарный перепад давления на воздушных фильтрах составит 1150 Па.

Надо помнить, что помимо фильтров в КВОУ установлены теплообменные аппараты и глушители шума, которые имеют свои перепады давления. Не надо забывать и о сезонной ступени очистки атмосферного воздуха – противомоскитной сетки. В совокупности эти

устройства в чистом состоянии имеют перепад давления порядка 100 Па. Таким образом, фактический будет достигнута уставка предупредительной сигнализации в 1300 Па.

Для ГТУ GE 9HA.01, работающей в Казане, имеющей трехступенчатую систему очистки циклового воздуха, на каждой ступени КВОУ могут быть установлены фильтры с конечным перепадом давления 450 Па.

В случае двухступенчатой системы фильтрации воздуха допустимо применение на первой ступени фильтр элементов с конечным перепадом давления 450 Па, а на финишной ступени фильтров 625 Па.

Как видите, в качестве критерия выбора воздушных фильтров для КВОУ, мы ориентируется на рекомендации (требования) производителей энергетических ГТУ.

Для снижения начального перепада давления на фильтрах и увеличения их срока службы целесообразно в качестве финишной ступени фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ применять кассетные фильтры глубиной 600 мм и площадью фильтрации 45-50 м². Как показал опыт эксплуатации систем очистки воздуха с такими фильтрами шведской компании С и немецкой компании FAIST на электростанциях в различных климатических условиях, срок службы фильтров может достигать 3 - 4 года. Результаты расчетов ЖЦ фильтров с глубиной 600 мм, выполненных нами для сельскохозяйственной местности и в экстремальных условиях пожаров, показали, что срок службы таких фильтров может составить 5 лет.

Давление на разрыв воздушных фильтров

Компания Siemens AG установила, что давление на разрыв фильтров тонкой очистки должно быть более 3000 Па. Однако, в документе [38] эти требования предъявляются к ФТО класса F7–F8. Отмечено, что эти фильтры должны сохранять свою эффективность при работе в условиях относительной влажности воздуха 100% (в постоянном режиме, с насыщением материала) и перепада давления 2000 Па. Следует обратить внимание и на внешние условия эксплуатации воздушных фильтров в КВОУ ГТУ, указанные в этом бюллетене: минимум –20°С/максимум +50°С. Можно однозначно констатировать, что такие температуры атмосферного воздуха не соответствуют макроклиматическим районам нашей страны согласно ГОСТ 15150-69.

Аттестованный компанией Siemens AG производитель КВОУ компания FAIST без привязки к температурным условиям эксплуатации настоятельно рекомендует использовать фильтры тонкой очистки с давлением на разрыв более 6000 Па как в сухом, так и смоченном состоянии. Согласно требованиям компании Siemens AG, воздушные карманные фильтры **не допускаются** к установке на ступенях тонкой (финишной)

очистки циклового воздуха ГТУ. По понятным соображениям, это требование обусловлено недостаточной прочностью конструкции таких фильтров.

Для воздушных фильтров классов G и M (ГОСТ Р ЕН 779-2014) требования по давлению на разрыв этими компаниями не предъявляются. Опыт эксплуатации воздушных фильтров этих классов в КВОУ ГТУ показывает, что и для них необходимо устанавливать давление на разрыв. Фильтры коагуляторы некоторых производителей разрушались уже при перепаде давления на них 400–500 Па. В результате поврежденный фильтровальный материал попадал на фильтры второй ступени, увеличивая их перепад давления и снижая эффективность очистки воздуха. Поскольку такие фильтры устанавливаются на промежуточных ступенях фильтрации циклового воздуха в КВОУ ГТУ, а не на финишной ступени, то и давление на разрыв могут быть меньше.

Опираясь на современные разработки воздушных фильтров и результаты их тестирования в независимых лабораториях и институтах, авторы считают целесообразным определить минимальное давление на разрыв карманных фильтров класса G равным 2000 Па, для фильтров класса M – 3000 Па. В случае двухступенчатой системы фильтрации циклового воздуха ГТУ с использованием фильтров класса M на первой ступени давление на разрыв должно быть увеличено до минимального значения 4000 Па.

Надо иметь в виду, что бюллетень компании Siemens AG [38] был выпущен в 2005 г. В 2010 г. появился бюллетень Siemens AB [24], рекомендующий улучшить эффективность очистки циклового воздуха ГТУ. В нем фильтр-элементы класса F7–F9 предлагалось использовать уже в качестве фильтров предварительной очистки.

С нашей точки зрения давление на разрыв кассетных фильтров класса F должно зависеть от их назначения. В случае использования их в качестве фильтров предварительной очистки давление на разрыв должно быть более 5000 Па, при установке на финишной ступени очистки и фильтров класса E – более 6000 Па. Приведенные значения давления на разрыв для всех фильтров, используемых в КВОУ ГТУ, должны быть обеспечены как в сухом, так и мокром состоянии (100% влажности) фильтров.

Кассетный фильтр класса F, установленный реверсно к финишному фильтру в КВОУ ГТУ, должен иметь надежную защитную сетку или решетку фильтровального материала, установленную на чистой стороне воздуха (по потоку воздуха).

Установка кассетных фильтров без защитных сеток или пластмассовых решеток в КВОУ ГТУ не допускается. Установка кассетных фильтров с рамкой и/или защитной сеткой (решеткой) из металла в КВОУ ГТУ не допускается.

Карманные фильтры, закрепленные реверсно к финишному фильтру в КБОУ ГТУ, должны иметь самоустанавливающиеся карманы или корзины из нержавеющей стали для поддержания формы карманов. Карманы должны быть спаяны, а не прошиты.

Тестирование воздушных фильтров на водостойкость

Статический метод

Для определения водостойкости текстильных материалов в 1992 г. Европейским комитетом по стандартизации был принят стандарт EN 20811 “Метод определения водостойкости. Испытание гидростатическим давлением” [15], который основан на стандарте CEN/TC 248 “Текстиль и текстильные изделия” Международной организации по стандартизации (ISO). Настоящий стандарт распространяется на текстильные материалы и устанавливает метод определения водостойкости ткани путем создания гидростатического давления. Гидростатическое давление, выдерживаемое материалом, является мерой сопротивления проникновению воды через ткань. Критерием водостойкости текстильного материала является давление, при котором на поверхности пробы появилась третья капля воды.

Компания FAIST AIS предлагает тестировать воздушные фильтры тонкой очистки для КБОУ ГТУ наполнением водой их V-образных секций. Фильтры глубиной 292 мм рекомендуется заполнять водой на 250 мм, а фильтр-элементы размером 440 мм – на 350 мм. Масса залитой воды оказывает существенное гидростатическое давление на донную часть V-образной секции фильтра. Под воздействием давления воды проверяется водостойкость фильтровального материала и герметичность стыков его с рамкой фильтра. Таким образом, задачей этого теста является подтверждение как водостойкости, так и общей целостности конструкции фильтра.

Критерием оценки водостойкости является отсутствие протечек в течение 30–60 мин. Момент протечки (появление первой капли воды) фиксируется хронометром. Статические испытания воздушных фильтров гидростатическим давлением проводят многие известные производители этой продукции. Сравнение тестов воздушных фильтров по определению время протечки воды, выполненных данными способами, не представляется возможным, поскольку скорость подачи воды у них разная. Кроме того, в методиках тестирования кассетных воздушных фильтров гидростатическим давлением разных компаний используются свои требования по уровню и количеству V –образных секций, заполняемых водой. Одни компании осуществляют заполнение водой всех V –образных секций фильтра на 100% в отличие от компании FAIST AIS, требующей наполнение водой только 86-87% уровня V – образной секции фильтров. Следовательно,

сравнение водостойкости воздушных фильтров даже одного типоразмера, выполненных по этим методикам, также невозможно из-за разной величины гидростатического давления, создаваемого в V – образных секциях фильтров.

Недостатком этого способа тестирования являются:

- рекомендации касаются только двух типоразмеров кассетных воздушных фильтров тонкой очистки;
- отсутствие обоснования уровня заполнения водой V-образных секций кассетных фильтров тонкой очистки;
- одновременное заполнение водой V-образных секций кассетных фильтров тонкой очистки, что не соответствует реальным условиям эксплуатации;
- отсутствие обоснования критерия временного интервала задержки протечек воды в течение 30–60 мин;
- отсутствие обоснования объема наливаемой воды и скорости заполнения V-образных секций кассетных фильтров водой, влияющих на временной критерий, в результате чего сравнение водостойкости различных фильтр-элементов возможно только на одном испытательном стенде;
- отсутствие рекомендаций по тестированию воздушных фильтров грубой и средней очистки, используемых в КВОУ ГТУ в качестве коагуляторов.

Динамический метод тестирования

Различия в методиках тестирования воздушных фильтров наблюдаются у производителей этой продукции и при проведении динамических испытаниях фильтр элементов. Производители фильтров тестируют свою продукцию с помощью трех и даже одной форсунки, что, конечно, ограничивает возможности испытательного стенда по расходу воды, подаваемой на фильтр элемент. Наличие нескольких форсунок, установленных на определенном расстоянии от фильтра, позволяет обеспечить равномерное распределение аэрозоля с заданной дисперсностью по всей площади входного сечения тестируемого образца.

В процессе динамических испытаний воздушных фильтров различными производителями наблюдается разброс в количестве воды подаваемой на воздушные фильтр – элементы от 0,4 л/мин до 2,5 л/мин и более. Следовательно, этот параметр также препятствует корректному сравнению результатов тестов на водостойкость воздушных фильтров, выполненных различными производителями.

Кроме того, как в методике статических, так и динамических испытаний воздушных фильтров на водостойкость нет единого критерия определения водопроницаемости: у

одних - это первая выступившая капля, у других - течь воды на чистой стороне фильтра.

Единственным связующим параметром во всех типах испытаний воздушных фильтров на водостойкость может являться количество воды, подаваемой через форсунки или наливом в V – образной секции тестируемых образцов.

Предлагаемый метод тестирования фильтров на водостойкость

Количество воды и продолжительность ее подачи в воздушные фильтр элементы регламентируется ГОСТ 15150-69 для конкретного макроклиматического района эксплуатации ГТУ.

Попробуем разобраться какое количество воды целесообразно использовать при тестировании воздушных фильтров на водостойкость на примере Москвы [31]. С этой целью обратимся к статистике Гидрометеоцентра РФ по среднему количеству осадков в Москве за 30 лет (Рис.4.47 и Табл.4.21). Согласно данным среднегодовое количество осадков в нашем регионе составляет 691 мм, при этом самым сухим месяцем в году считается март, а самым дождливым – июль.

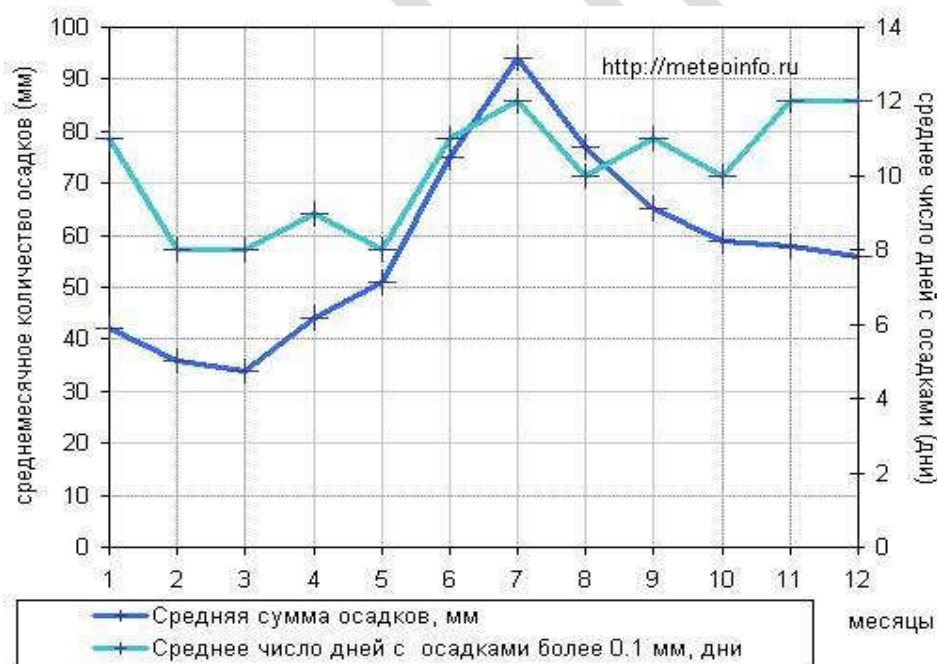


Рис.4.47. Среднее количество осадков за 30 лет в г. Москва по данным Гидрометеоцентра

Аналогичные данные по количеству осадков в г. Москве (690 мм) представлены в Своде Правил СП 131.13330.2012 “Строительная климатология” [55]. Кроме того, там дана разбивка этой величины на два временных периода: март - ноябрь (225 мм) и апрель – октябрь (465 мм).

Табл.4.21. Среднее количество осадков в Москве за 30 лет (<http://meteoinfo.ru>)

Показатель	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q , мм	42	36	34	44	51	75	94	77	65	59	58	56
n с высотой осадков более 0.1 мм	11	8	8	9	8	11	12	10	11	10	12	12

Следует отметить, что метеорологи различают два понятия: высота снежного покрова и количество выпавших осадков. Согласно метеорологическому наставлению один миллиметр осадков численно равен одному литру воды, вылившейся на площадь в один квадратный метр ($л/м^2$) или с учетом плотности воды - $кг/м^2$. Один миллиметр выпавших осадков приравнивается к 1 - 1,5 сантиметрам высоты снежного покрова, в зависимости, от структуры снега.

Таким образом, через среднегодовое количество осадков мы выходим на параметр гидростатического давления ($кг/м^2$), которое возможно использовать при определении водостойкости воздушных фильтров. Площадью, на которую воздействует вес воды, является эффективная площадь фильтрации тестируемого образца.

Для проведения динамических испытаний воздушных фильтров необходимо корректно задать расход воды через форсунки стенда. Для этого необходимо знать интенсивность осадков в конкретном регионе эксплуатации ГТУ, в нашем случае в Москве.

Данные об интенсивности осадков можно получить из справочного пособия: «Таблицы параметров предельной интенсивности дождя для определения расходов в системах водоотведения» [56]. Здесь приведены основные формулы для расчёта дождевого стока и гидравлического расчёта коллекторов. Даны таблицы ординат кривых редукиции относительных (отнесенных к суточному слою осадков) интенсивностей для 201 дождевого района, таблицы расчётных интенсивностей 20-минутной продолжительности для различных вероятностей повторения дождей (q_{20}).

Другим документом, дающим информацию об интенсивности дождя, является Свод Правил СП 32.13330.2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения». Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85 (с Изменением N 1). Настоящий свод правил устанавливает нормы проектирования вновь строящихся и реконструируемых систем наружной канализации постоянного назначения для городских и поверхностных

стоков, а также близких к ним по составу производственных сточных вод. В приложении “Б” этого СП представлена карта нашей страны с нанесенными на нее областями определенных значений величины q_{20} [57].

Согласно этим документам для московского региона $q_{20} = 80$ литров в секунду на 1 га местности, продолжительностью 20 минут при периоде однократного превышения расчетной интенсивности осадков за годы наблюдений.

Приведенные выше два источника информации относятся к сфере проектирования, строительства и реконструкции систем водоотведения и канализации. Документом, регламентирующим исполнение оборудования для различных климатических регионов, является Межгосударственный стандарт ГОСТ 15150-69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды».

В соответствии со стандартом регион г. Москвы относится к умеренному климату (У). Пункт 3.9. данного стандарта указывает, что интенсивность дождя (верхнее рабочее значение) для изделий исполнения У составляет 3 мм/мин. В примечании к этому пункту отмечено, что для исполнения У, УХЛ (ХЛ) допускается руководствоваться обязательным приложением № 5 стандарта в части сочетания интенсивности и продолжительности дождя (Табл.4.22).

Табл.4.22. Интенсивности и продолжительность дождя в районах с умеренным и холодным климатом

№ п/п	Интенсивность дождя, мм/мин приложение 5 ГОСТ 15150-69	Продолжительность дождя приложение 5 ГОСТ 15150-69	Расчетное количество воды, выпавшей с дождем на 1 м ² площади, л
1	3	5 минут подряд (1-2 раза в 1-2 года)	15 (1 раз в 1-2 года)
2	1,5	1 час подряд	90
3	0,5	5 часов подряд	150

Из выполненных расчетов видно, что данные по интенсивности и продолжительности дождя, представленные в СП 32.13330.2012, не сочетаются с величинами этого параметра из ГОСТ 15150-69. Поскольку областью применения свода Правил является строительство и реконструкция систем канализации, останавливаем свой выбор на Межгосударственном стандарте ГОСТ 15150-69, который является руководящим

документом по исполнению машин, приборов и других технических изделий для различных климатических районов.

Тогда, зная размеры (объем) V- образных секций кассетных фильтров и их эффективную площадь фильтрации, с учетом данных приведенных в Табл.4.22, можно осуществлять тестирование фильтра гидростатическим давлением, наполняя водой все V-образные секции. Выполненные нами исследования по тестированию воздушных фильтров тонкой очистки различных производителей по определению их водостойкости показали, что в образец размерами 592x592x292 мм с четырьмя V- образными секциями, помещается 36,4 литров воды, а в такой же ФТО, но с габаритами 592x592x440 мм – 72 литра. Этим объемам воды соответствует 100% заполнение всех V- образных секций фильтров (см. главу.3). При этом эффективная площадь фильтрации первого фильтра равнялась 19,4 м², а второго - 30,8 м². Как видно из приведенных данных, соотношение эффективных площадей двух фильтров равно 1,59, а объемов воды -1,98. Другими словами, прямой пропорциональной зависимости между этими параметрами не прослеживается. Это обусловлено типом, толщиной фильтровального материала, плотностью укладки его плиссированных складок и другими особенностями конструкции фильтров разных производителей.

Отношение количества воды, налитой в фильтр к его эффективной площади фильтрации, дает значение расчетного количества влаги, поступившей на 1 м² площади. Для ФТО с размерами 592x592x292 мм эта величина равна 1,88 л/ м², а для фильтра с габаритами 592x592x440 мм – 2,34 л/ м².

Сравнивая эти величины со значениями, приведенными в Табл.4.22, приходим к выводу, что даже 100% заполнение фильтров тонкой очистки водой не совпадает ни с одним из трех значений расчетного количества воды, выпавшей с дождем на 1 м² площади. Другое дело, что при соответствующем оснащении лабораторного стенда, можно осуществить заполнения воздушного фильтра максимальным количеством воды за промежутки времени меньше 5 минут для интенсивности дождя 3 мм/мин. Так, полное заполнение водой ФТО с размерами 592x592x292 мм на одном стенде было выполнено за 3 минуты 2 секунды, на другом - фильтр с габаритами 592x592x440 мм заполнили за 48 секунд.

Таким образом, меняя интенсивность заполнения водой воздушных фильтров, можно моделировать количество воды, поступающей на 1 м² площади. Например, для ФТО с габаритами 592x592x440 мм, интенсивность заполнения фильтра 72 литрами воды за 48 секунд, соответствует 450 литров за 5 минут. Или с учетом эффективной площади

фильтрации этого образца $30,8 \text{ м}^2$, получаем количество воды, выпавшей на 1 м^2 площади, равное $14,6 \text{ л}$, что практически совпадает со значением 15 л , приведенным в табл.2 для интенсивности дождя 3 мм/мин в течение 5 минут подряд.

Описанная процедура тестирования воздушного фильтра на водостойкость, представляет собой, ничто иное как, вариант эквивалентных испытаний, которым подвергаются многие образцы машин, приборов и других технических изделий для различных климатических районов.

Другим методом моделирования климатических условий эксплуатации воздушных фильтров во время атмосферных осадков являются динамические испытания на водостойкость на лабораторном стенде, с помощью распыла воды через форсунки. С помощью этого метода значительно проще, при соответствующем оснащении испытательного стенда, смоделировать параметры интенсивности дождя в конкретный промежуток времени по ГОСТ 15150-69. Но, и в данном случае, для сокращения сроков тестирования (например, в течение 3 часов подряд) и экономии энергоресурсов, целесообразно прибегать к эквивалентным испытаниям воздушных фильтров.

Считаем целесообразным включить следующие требования по определению водостойкости воздушных фильтров для КВОУ ГТУ в новый ГОСТ Р [17]:

1. Осуществлять тестирование воздушных фильтров всех классов и типов, используемых для КВОУ ГТУ, на водостойкость статическим и динамическим методами.
2. Все секции фильтров должны заполняться водой одновременно, создавая одинаковое гидростатическое давление.
3. Посекционное заполнение фильтров водой может применяться в статическом методе тестирования для определения протечек между секциями фильтр элемента.
4. Для визуализации мест протечек воду, подаваемую в фильтр элементы, при необходимости подкрашивать неагрессивными красителями.
5. Время и объем подаваемой воды на воздушные фильтры определяется на основании ГОСТ 15150-69 для конкретного макроклиматического района.
6. Критерием водостойкости воздушных фильтров считать время, в течение которого после начала подачи воды на обратной (чистой) стороне фильтр – элемента появится третья капля подкрашенной жидкости.
7. Тест на водостойкость считается пройденным, если в течение времени подачи объема воды, соответствующего конкретному макроклиматическому району по

ГОСТ 15150-69, на обратной стороне фильтр элемента не появится три капли влаги.

Климатические испытания

Целью климатических испытаний является подтверждение начального перепада давления и эффективности воздушного фильтра до и после нахождения фильтра тонкой очистки при температуре и влажности соответствующей конкретному макроклиматическому району эксплуатации изделия согласно ГОСТ 15150-69 в течение некоторого времени. Эти испытания осуществляются не только с целью определения (подтверждения) технических характеристик фильтров, но и для оценки прочности их конструкции, стойкости пластмассовых и резиновых компонентов фильтр – элементов к температурам и влажности окружающей среды свойственным климатическим условиям эксплуатации оборудования.

Считаем целесообразным включить следующие требования по климатическим испытаниям воздушных фильтров для КВОУ ГТУ в новый ГОСТ Р:

1. Моделирование климатических условий эксплуатации воздушных фильтров в реальных условиях с помощью климатических камер должно стать обязательным условием проверки технических характеристик фильтр – элементов и их конструкции.
2. Тестирование воздушных фильтров в климатических камерах должно осуществляться в точном соответствии с техническим заданием на продукцию и ГОСТ 15150-69 для конкретного макроклиматического районирования.
3. После климатических испытаний необходимо осуществить контроль воздушных фильтров на проскок масляной стружкой (масляной нитью) и определение их водостойкости.

Резюме:

Применительно к воздушным фильтрам для КВОУ ГТУ требования ГОСТ 15150-69 можно сформулировать следующим образом:

- Фильтр элементы должны быть спроектированы таким образом, чтобы выдерживать механические напряжения, которые могут возникать при нормальном использовании.

Для этого: фильтр элемент должен выдерживать давление на разрыв в сухом и влажном

состоянии в зависимости от своего назначения. Фильтры тонкой очистки (финишные) должны быть снабжены защитной сеткой со стороны выхода воздуха (чистой стороны), обеспечивающей заданное давление на разрыв. Защитная сетка может быть синтетической или пластмассовой. Запрещается применение металлических защитных сеток.

- Фильтр элемент должен быть изготовлен из материала, позволяющего выдерживать воздействие температуры, влажности и агрессивной среды, при которых ему предстоит работать. Фильтрующий элемент не должен быть подвержен коррозии. Для подтверждения своей работоспособности в конкретных климатических условиях фильтр элементы должны подвергаться испытаниям в климатических камерах независимых институтов или аттестованной лаборатории заказчика продукции;

- Пластмассовые элементы воздушных фильтров и боксов комбинированных систем фильтрации должны быть изготовлены из высокопрочного АБС – пластика.

Пластмассовые изделия не должны деформироваться под воздействием усилия руки.

Твердость пластмассовых изделий должна проверяться с помощью твердомера (дюрометра) по Шору тип D или по Роквеллу;

- Во избежание протечек грязного воздуха и влаги через место установки фильтр элементов в КВОУ на их рамках должна быть установлены бесшовные упругие уплотнения (прокладки); Твердость резиновых изделий (прокладок) и мягких пластмасс определяется с помощью дюрометра по Шору тип А.

- Во избежание протечек грязного воздуха и влаги стыки фильтровального материала и рамки фильтра должны быть надежно герметизированы;

- Для проверки эффективности и начального перепада давления фильтр элементы должны подвергаться тестированию на испытательных стендах независимых институтов или в аттестованных лабораториях заказчика продукции;

- Критерием замены фильтров в КВОУ должен быть не только предельно - допустимый перепад давления, но и показатель деградации эффективности фильтров (проскок частиц).

Проскок частиц через фильтр элемент определяется в процессе мониторинга загрязненности воздуха на его входе и на выходе.

- Для проверки водостойкости фильтр элементы должны подвергаться статическому и динамическому тестированию на испытательных стендах независимых институтов или в аттестованных лабораториях заказчика продукции;

- В процессе тестирования на водостойкость количество подаваемой воды в фильтр элементов должно соответствовать макроклиматической зоне эксплуатации ГТУ, о чем должно быть указано в протоколе испытаний;
- Для снижения проникновения пыли и влаги карманы фильтров должны быть спаяны, а не прошиты; карманы снабжены фиксаторами для предотвращения их слипания;
- При использовании охладительных установок испарительного типа для предотвращения проникновения влаги в систему очистки воздуха, на первой ступени КВОУ целесообразно устанавливать фильтры коагуляторы, изготовленные по технологии DS или имеющие мембрану;
- Карманные фильтры не должны устанавливаться в качестве финальных фильтров в КВОУ ГТУ;
- Фильтры коагуляторы должны иметь дренаж отводящий атмосферную влагу в сторону грязного воздуха;
- Кассетные фильтры в зависимости от места их установки должны иметь дренажные канавки, отводящие влагу на сторону грязного воздуха;
- Все фильтр элементы должны соответствовать требуемому по месту эксплуатации классу пожаробезопасности;
- Каждый фильтр элемент должен иметь фирменную маркировку с указанием адреса производителя, названия, эффективности, начального и конечного перепада давления, номинального расхода воздуха, эффективной площади фильтрации, графического и словесного обозначения правильной установки в КВОУ.

Ничтожный человек стремится к выгоде,
а благородный к справедливости
Конфуций

4.12. Техническое задание на закупку воздушные фильтры для КВОУ ГТУ

Технического задания (ТЗ) на приобретение воздушных фильтров для КВОУ ГТУ является первостепенным документом для энергетических компаний для закупки качественной, эффективной и климатических обоснованной продукции. Не секрет, что подчас основным критерием выбора того или иного поставщика воздушных фильтров является цена его продукции. Красной нитью, проводимой нами через все содержание книги, была мысль: Что дороже? «Здоровье» энергетической ГТУ на многие годы вперед или ежеминутная «выгода» от экономии средств на закупку воздушных фильтров?

Думаем, что уместно повторить ранее высказанную мысль: **«Воздушные фильтры – это вспомогательное оборудование, но не второстепенное!»**. Многочисленные примеры, приведенные нами в книге по результатам эксплуатации энергетических ГТУ, надеемся убедили Вас в правильности этой фразы.

Мы специально выдели этот материал в отдельный параграф, чтобы помочь инженерному персоналу электростанций в составлении грамотного технического задания на закупку воздушных фильтров КВОУ ГТУ. Конечно, это возможно если Вам не дано поручение осуществить закупку у одного источника. В таком случае ТЗ составляется легко под конкретного поставщика продукции. Если поставщик не изготавливает кассетные фильтры элементы глубиной 600 мм, не смотря на техническую и экономическую целесообразность электростанции, значит этих фильтров в ТЗ не должно быть. Если поставщик не производит кассетные фильтры для реверсной установки в КВОУ с защитной сеткой внутри V-секций, значит такие фильтры не рассматриваются и на ТЭЦ поступают фильтры без защитных сеток. Таких примеров в книге приведено не мало.

Здесь речь пойдет о тех, кто честно стремится в процессе закупочной процедуры оснастить КВОУ надежной и эффективной системой очистки циклового воздуха энергетические ГТУ.

Первоначально необходимо понять какой уровень загрязненности окружающей среды **именно на всасе КВОУ каждой ГТУ**. Для этого необходимо организовать мониторинг

окружающей среды на месте размещения КВОУ. Затем, проанализируйте эффективность ранее установленных фильтров, методом замера загрязненности циклового воздуха ГТУ перед и за фильтрами с помощью счетчиков частиц. Для этого потребуется проведение организационно-технических мероприятий по закупке счетчиков частиц и обучению штатного персонала пользоваться ими, а также методике замеров. Если на электростанции одна или несколько ГТУ, то это достаточно просто организовать. В составе энергетической компании, расположенной в одном городе, эта задача усложняется, в части закупки одинаковых счетчиков частиц для всех ТЭЦ и подготовки персонала. В этом случае, в энергетической компании должен быть выделен человек ответственный за сбор информации и анализа о загрязнение воздуха на всасе КВОУ ГТУ. В составе энергокомпании целесообразно внедрить рейтинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе всех КВОУ ГТУ, что позволит осуществлять централизованный контроль за состоянием систем фильтрации воздуха. Эти данные станут информационной базой при подготовке ТЗ для закупки фильтров КВОУ ГТУ. Причем, в каждом конкретном случае (для каждой ТЭЦ), это могут быть фильтры разной эффективности и назначения.

Следует помнить, что только мониторинг загрязненности воздуха на всасе КВОУ энергетических ГТУ дает объективную оценку состояния окружающей среды. Эта информация позволяет прогнозировать жизненный цикл фильтр элементов.

Будьте бдительны, когда кто-то из поставщиков этой продукции будет заявлять, что только при закупке у него фильтров для всех ступеней КВОУ, он может гарантировать их надежную работу. Это ничего иное, как маркетинговая уловка бизнеса. Выбирайте для каждой ступени очистки воздуха КВОУ наиболее эффективные и надежные фильтры.

Далее, исходя из конкретного макроклиматического районирования ТЭЦ или энергетической компании, примите решение какие результаты испытания фильтр элементов должны предоставить потенциальные поставщики этой продукции от независимых лабораторий: климатические испытания (температура, влажность), давление на разрыв в сухом и влажном состоянии. В случае поставки продукции дистрибьютером компании, **обязательно** проверьте соответствие технических характеристик, указанных в паспортах фильтр элементов с данными представленными на официальном Web-сайте головного офиса.

Не выставляйте излишних, завышенных требований по климатическим испытаниям, как это сделала ТЭЦ, расположенная в районе Сочи, затребовал результаты тестов фильтров при температуре -60°C . Пожалуйста, помните, что каждый тест стоит денег и

порой не малых. Запрашивать новые («свежие») тесты необходимо в случае отмены одних и введение в действие других ГОСТ, новых моделей фильтров или изменения условий эксплуатации ГТУ. Например, изготовлении фильтров по программе импортозамещения или локализации производства в нашей стране для иностранных поставщиков.

Пожалуйста, помните, что каждый тест справедлив, только для испытанного фильтра и результаты теста не могут быть распространены на всю партию приобретаемых фильтров.

Авторам хорошо известны случаи, когда производители фильтров осуществляли **специальную (тщательную) подготовку** фильтр элемента для тестирования в независимой лаборатории. После получения положительного результата, контроль за изготовлением фильтров на конвейере ослабевал. Особенно, это касается отдельных дистрибьютеров иностранных компаний, осуществляющих **сборочное производство** из деталей, полученных из головного офиса. Качество собранных фильтров головной офис не проверяет, тестированию, даже выборочному, фильтр элементы не подвергаются. Но, тем не менее предоставляются результаты положительных тестов, выполненных в независимых иностранных лабораториях из головного офиса. Именно таким образом, на отечественные ТЭЦ в основном поступает некачественная продукция известных зарубежных марок. На самом деле ничего общего эти фильтры с первоисточником, кроме внешнего вида, не имеют. Отсюда напрашивается правомерное требование - **если, фильтр элемент изготовлен в нашей стране, то будьте любезны предоставить тесты от независимых лабораторий именно на этот фильтр, а не на продукцию головного офиса.**

Мы рекомендуем, **в обязательном порядке** в процессе процедуры закупки оставлять у себя фильтр элементы, представленные продавцом как образцы, для дальнейшего сравнения с качеством серийной продукции.

В случае если конструкция КВОУ имеет антиайсинговую систему с отбором горячего воздуха от компрессора ГТУ, не рекомендуем устанавливать на первой ступени очистки карманные фильтры базовым способом. Необходима реверсная установка для предотвращения блокирования карманов фильтра снегом при эксплуатации в зимний период времени. В этом случаи карманы фильтров должны быть самоподдерживающимися или снабжены металлическими корзинами из нержавеющей стали, либо пластмассовыми фиксаторами карманов.

Если в процессе процедуры закупки у двух поставщиков оказались одинаковые результаты, а на ТЭЦ установлен блок ПГУ с двумя ГТУ и одной паровой турбины,

целесообразно, дать шанс обоим поставщикам. Установите их фильтры на рядом стоящие КВОУ и проанализируйте, какие результаты будут получены в течении одного года эксплуатации.

Еще проще обстоит дело, когда на ТЭЦ два рядом стоящих энергоблока ПГУ. Четыре КВОУ позволяет провести сравнительный анализ, своего рода соревнование, нескольких поставщиков фильтров одновременно. В любом случае, рекомендуем не останавливать выбор на одном поставщике. Как показал многолетний опыт эксплуатации энергетических ГТУ, «постоянный» поставщик фильтров со временем уверив в свою исключительность, снижает контроль за своей продукцией и теряет свой статус.

Заинтересованный поставщик воздушных фильтров не теряет интерес к объекту поставки сразу по завершению процедуры закупки фильтров. В течение всего времени эксплуатации он приезжает, осматривает свои фильтры, анализирует влияние системы фильтрации на эксплуатационные характеристики ГТУ. **Но, включать эти положения в процедуру закупки фильтров не правомерно.** Это не процедура закупки, это научно-исследовательская работа, которая выполняется по другому договору (контракту).

Нам приходилось неоднократно, по заданию ряда отечественных энергетических компаний проверять отчеты поставщиков фильтров об их работе на конкретном объекте. Содержание таких отчетов отработано до автоматизма: негатив предыдущей системы фильтрации циклового воздуха ГТУ, положительные характеристики предлагаемых воздушных фильтров, красивые графики снижения деградации характеристик ГТУ и типичный вывод: «Ставьте наши фильтры и все будет хорошо!». Положительный результат таких отчетов заведомо известен.

Мы, уже не раз, и не два опровергали эти расчеты, показывая их несостоятельность. Ошибки в «пользу» выполнивших расчеты поставщиков фильтров доходили до 30%! Обещание поставщиков эффективных фильтров классов E10-E11, что после их установки в КВОУ online промывки ГТУ делать больше не надо не соответствует действительности! Промывки как делали, так и делаются, а лопатки компрессора ГТУ, как были грязными, так и остаются такими же.

На ТЭЦ Saltend (Великобритания) после установки эффективных фильтров в КВОУ промывки ГТУ не осуществлялись 4 года и лопатки компрессора оставались идеально чистыми. Это при условии, что ТЭЦ работает в сложнейших климатических условиях повышенной влажности, наличия в воздухе угольной и керамической пыли. В чем же дело? А это как раз и есть ответ на вопрос о качестве фильтров, поставляемых на

отечественные ТЭЦ отдельными дистрибьютерами западных компаний. Эффективность предлагаемых ими фильтров существуют только на бумаге.

«Самое обидное, что в информационной войне всегда проигрывает тот, кто говорит правду. Он ограничен правдой, а лжец может нести все, что угодно» (Роберт Шекли).

Критерием эффективной работы системы фильтрации циклового воздуха ГТУ является состояние «чистой стороны» КВОУ и лопаток осевого компрессора турбомашин.

Не занимайтесь самообманом. Анализ результатов эксплуатации фильтров КВОУ ГТУ надо поручать сторонним организациям или известным экспертам в вопросе фильтрации воздуха, а не поставщикам этих фильтров.

Целесообразно в ТЗ на закупку фильтров класса E10-E12 для КВОУ энергетических ГТУ включать пункт о гарантировании поставщиком фильтров отсутствие online промывок и одной offline промывки в течении года. Если в процессе эксплуатации будет наблюдаться деградация характеристик ГТУ и потребуются промывка компрессора, то поставщик фильтров должен будет компенсировать затраты на моеющее средство. Это требование охладит поставщиков некачественной продукции на отечественные ТЭЦ, а энергетикам даст дополнительные гарантии.

«Время разбрасывать камни, и время складывать камни» (царь Соломон).

Еще более осторожно относитесь к предложениям поставщиков фильтров о заключении долгосрочного сервисного контракта на обслуживание КВОУ ГТУ. Это «оружие» обоюдоострое. С одной стороны, Вам обещают осуществлять руками представителей поставщика снятие и установку фильтров в КВОУ, поддержания чистоты и порядка в КВОУ, выполнять технический осмотр насосов, другого оборудования ВЗТ. Снятие и установка фильтров в КВОУ это большое подспорье для персонала ТЭЦ, которого постоянно не хватает.

С другой стороны, отсутствие допусков на работу на высоте сотрудников этой компании, работы с электрооборудование, знаний инструкций по эксплуатации и планово-предупредительных ремонтов оборудования, выполнения промывки ГТУ. В таких компаниях обычно только менеджеры по продажам, не обладающие такими знаниями и навыками. Поэтому, компания продавца фильтров нанимает субподрядчика, имеющего такие допуски и знания, который и осуществляет эти работы. Тогда возникают резонные вопросы: Зачем заключать договор сервисного обслуживания КВОУ с компанией, которая

только поставляет воздушные фильтры в рамках этого договора и ничего более? Разве недостаточно в этом случае договора на поставку фильтров? Почему не заключить договор на сервисное обслуживание КВОУ со специалистами, имеющими соответствующую квалификацию и допуски? Это будет и дешевле на 20-30%, и соответствовать требованиям руководящих документов по технике безопасности. Такой долгосрочный договор для поставщика фильтров является очень удобной лазейкой, чтобы ежегодно не участвовать в процедурах закупки фильтров и не предъявлять соответствующие тесты на испытания фильтров от независимых лабораторий. Не случайно отмечено, что со временем, при долгосрочном договоре, поставщик начинает устанавливать на КВОУ фильтры более низкого качества (Рис.4.48).



Рис.4.48. Некачественная герметизация и ее отсутствие в стыках фильтровального материала с рамкой в V-образных секциях кассетных фильтров

Рекомендуем при необходимости заключать договор на сервисное обслуживание КВОУ сроком на год и только со специализированными компаниями. В этом случае у энергетической компании появляется рычаг воздействия на недобросовестного исполнителя договора.

Как показал опыт эксплуатации воздушных фильтров в КВОУ ГТУ, многочисленные тесты фильтр элементов, выполненные в независимых лабораториях и институтах, испытания на водостойкость, основной проблемой кассетных фильтров является герметичность стыков фильтровального материала с рамкой фильтра. Поскольку не многим инженерам электростанций приходилось бывать на производственных линиях изготовления воздушных кассетных фильтров, ниже мы покажем технологические приемы нанесения герметика на стыки фильтровального материала и рамки фильтров. Фотографии любезно предоставлены турецкой компанией «Микропор» и публикуются с ее разрешения (Рис.4.49- 4.54).



а

б

Рис.4.49. Герметизация стыков в V-образных секциях кассетных фильтров: а – с одной стороны; б- с двух сторон



а

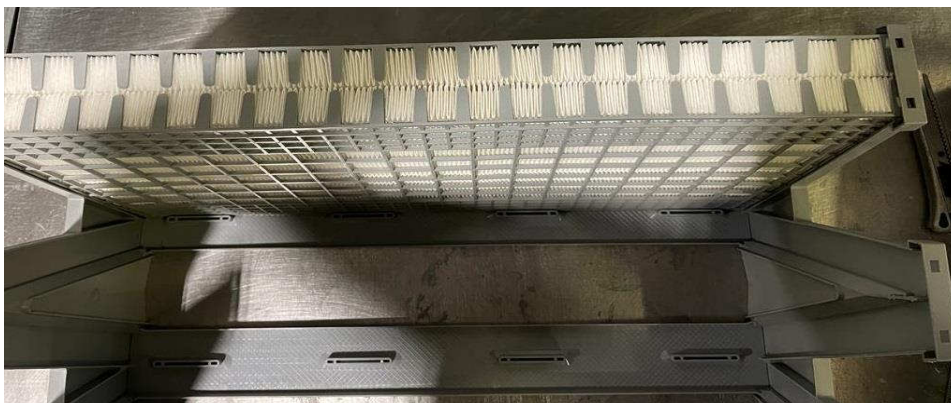
б

Рис.4.50. Герметизация стыков кассетных фильтров: а- по периметру; б- внутри V-образной секции

На рис.4.51 показано крепление защитных пластмассовых решеток в кассетных фильтрах.



а

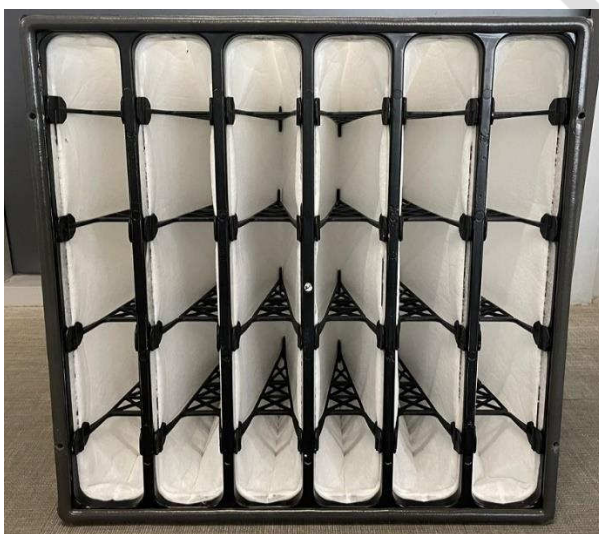


б

Рис.4.51. Крепление защитных пластмассовых решеток в кассетных фильтрах: а- с одной стороны; б- с обеих сторон

Благодаря такой защитной решетке кассетные фильтры компании Микропор выдерживают давление на разрыв более 6000 Па в сухом и влажном состоянии.

Для реверсной установки карманных фильтров перед кассетными фильтрами целесообразно использовать фильтр элемент, изображенный на Рис.4.52.



а



б

Рис.4.52. Карманный фильтр для реверсной установки: а- фронтальный вид; б- вид сверху

Такой фильтр имеет пластмассовые фиксаторы карманов для поддержания их формы, карманы спаяны, а не прошиты, по периметру рамки фильтра установлена бесшовная прокладка, обеспечивающая плотное прилегание карманного фильтра к кассетному (Рис.4.53).



Рис.4.53. Крепление карманного фильтра к кассетному

Пример реверсного крепления кассетного фильтра предварительной очистки к кассетному фильтру финишной очистки приведен на Рис.4.54. Кассетный фильтр предварительной очистки имеет защитную решетку внутри V-образной секции, а кассетный фильтр финишной очистки – на чистой стороне по ходу потока воздуха (Рис.4.54а).



Рис. 4.54. Реверсное крепление кассетных фильтров: а- внешний вид; б- фиксация

По периметру рамки фильтра предварительной очистки уставлена бесшовная полиуретановая уплотнительная прокладка, обеспечивающая герметичность прилегание к финишному фильтру (рис.4.54б). Плотность фиксации двух фильтров обеспечивается прижимными винтами. На тыльной стороне рамки финишного фильтра установлена бесшовная прокладка, обеспечивающая плотность прилегания к металлической ячейки КВОУ ГТУ. **Обращаем внимание на тот факт**, что количество и размеры V- образных

секций кассетных фильтров предварительной и финишной очистки воздуха совпадают с друг другом. В этом случае трансформации потока воздуха, поступающего из кассетного фильтра предварительной очистки в финишный фильтр, не происходит.

Приведенные фотографии являются своеобразным наглядным пособием в помощь инженерному персоналу при подготовке ТЗ на закупку воздушных фильтров для КВОУ энергетических ГТУ. Глядя на эти фотографии, постарайтесь не упустить в ТЗ необходимые требования к конструкции воздушных фильтров, соизмеряйте осевые размеры заказываемых фильтров с размером сервисных дорожек, с конструктивными особенностями КВОУ ГТУ, расположением в нем байпасных клапанов, светильников освещения в модулях фильтрационных отделений.

Надеемся, что наши рекомендации помогут инженерному персоналу энергетических компаний грамотно готовить технические задания на закупку воздушных фильтров КВОУ и, тем самым, обеспечить надежную и эффективную эксплуатацию ГТУ. Мы отчетливо понимаем, что в современной политической обстановке в мире, не просто обеспечить тестирование воздушных фильтров в независимых зарубежных лабораториях, аккредитованных по стандарту ISO/IEC 17025:2017. Отечественных лабораторий, аккредитованных по ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 для тестирования воздушных фильтров практически нет. Существующая аккредитованная российская лаборатория, не имеет даже «чистой комнаты (помещения)» для тестирования фильтр элементов группы ЕРА и НЕРА, хотя в ее аттестате аккредитации указан ГОСТ 1822-2010. Как такая лаборатория получила аккредитацию – большой секрет. Кроме того, она полностью аффилирована с компанией, производящей воздушные фильтры и находится с ней в одном том же здании. Назвать эту лабораторию независимой мы не имеем морального права.

Назрела острая необходимость создания в энергетической области действительно независимой лаборатории по тестированию воздушных фильтров, предназначенных для эксплуатации в КВОУ энергетических ГТУ. И такая работа уже ведется.

Напутствие читателю:

«Чем бы Вы не занимались, делайте это от всего сердца».

Конфуций

«Зорко одно лишь сердце. Самого главного глазами не увидеть» (Маленький принц)

Антуан де Сент-Экзюпери

Список литературы по главам

Глава 1

1. Sven Erik Dahlen, MD, PhD/ Severe asthma in adults: What are the important questions? 2007. <https://clck.ru/33RmLV>
2. Мониторинг CO₂ и качество воздуха в помещении. <https://goo.su/AOiu>
3. Ф. Маскрофт. Эксплуатационная стоимость воздушных фильтров газовых турбин и реальная работа фильтров. Доклад 2005, с.42.
4. Ihor S Diakunchak, Westinghouse inc., Gas and Steam Turbine Engineering, Power Generation Nechnjligy Division, "Performance Deterioration in Industrial Gas Turbines" ASME 91-GT-228.
5. Whitby, K.T., Assistant Professor Mechanical Engineering Department, University of Minnesota, etal. "ASHRAE. Airborne Dust Survey". Paper 1627, presented at the Annual Meeting of ASHRAE, Pittsburgh, January 1958.
6. Рост в полтора раза: в РФ побит рекорд по количеству случаев высокого загрязнения воздуха, 26 мая 2020 год. <https://clck.ru/33Roco>
7. Аналитики FinExpertiza назвали регионы с самым грязным воздухом, 26 августа 2020 год. <https://clck.ru/33RoaN>
8. Загрязнение воздуха становится причиной 800 тысяч смертей в год в Европе и 8,8 миллиона смертей во всем мире.2019. <https://goo.su/nyq8>
9. Жохов В.Л. Анализ принятых решений по выбору систем фильтрации воздуха ГТУ ТЭЦ//Энергетика. Экология. Экономика. 2007.№10. с.30-37.
10. Жохов В.Л. Помпаж в одноступенчатых нагнетателях// Энергомашиностроение 1988. № 3, с.10-12.
11. Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы). Учебное пособие /Под ред. доктора технических наук, профессора, академика МАНЭБ и АТП РФ А.Г. Ветошкина – Пенза: Издательство Пензенского технологического института, 2004.
12. F. Muscroft. Gas turbine Combustion Air It's Effects, Treatment and Operation cost. October, 2006, 106 pp.EN 1822-1-2009 "High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) - Part 1: Classification, Performance testing, marking".

13. EN 1822-1-2009 “High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) - Part 1: Classification, Performance testing, marking”
14. ISO 29463 “High - efficiency filters and filter media for removing particles in air”.
15. EN 779: 2012 “Particulate air filters for general ventilation - Determination of the filtration performance”.
16. ISO 16890 “Air filters for general ventilation —Part 1: Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM)”.
17. П.В. Голов, В.Л. Жохов, С.Н. Ленев. Новый глобальный стандарт для тестирования и оценки воздушных фильтров ISO 16890// Газотурбинные технологии. -2017.-№ 5. С.28-31.
18. ГОСТ Р 70064-2022 «Фильтры очистки воздуха общего назначения».
19. www.mikropor.com/wp-content/uploads/2022/04/002
20. www.freudenberg-filter.com/en/iso16890
21. www.camfil.com
22. ISO 29461-1:2013 “Air intake filter systems for rotary Machinery — Test methods — Part 1: Static filter elements. MOD”.
23. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Стандарты и ГОСТы для воздушных фильтров// Газотурбинные технологии.2020, №4, с.42-46.
24. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Многообразие стандартов ISO для проведения испытаний воздушных фильтров // Газотурбинные технологии.2020, № 7, с.44-47.
25. ISO 29461-1 (second edition 2017 -09) «High efficiency filters and filter media for removing particles from air -Part 1: Classification, performance, testing and marking».
26. ISO 29461-2 (First edition 2022-08) «Air intake filter systems for rotary machinery - Test methods - Part 2: Filter element endurance test in fog and mist environments»
27. Жохов В.Л., Ленев С.Н. О необходимости включения требования по определению водостойкости воздушных фильтров в стандарт// Новое в российской электроэнергетике. 2019. № 2. с.16 -24.
28. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Опыт эксплуатации КВОУ блоков ПГУ ПАО «Мосэнерго» и планы по их реализации// Новое в российской электроэнергетике. 2016. № 2. с.33 - 43.

Глава 2.

1. Клименко А.В., Колосов М.Ю. Энергетика. Экология. Энергосбережение. Информационно- аналитический бюллетень ПАО «Мосэнерго» 2022, № 1. с.39.

2. Извержения вулканов на нашей планете в 2019 году. <https://clck.ru/33VJ9v>
3. Эпичное извержение вулкана в Японии сняли на видео. <https://clck.ru/33VNqх>
4. Песчаная буря из Китая накрыла Благовещенск. <https://clck.ru/33VNbc>
5. Учёные выяснили, откуда взялась пыльная буря в Ростове осенью 2020 года. <https://clck.ru/33VKpr>
6. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Пожар>
7. Новости пресс-службы Правительства Москвы. Справка по состоянию атмосферного воздуха в Москве на 15:00 02 августа 2010 г.
8. Справка о загрязнении воздуха и метеорологических условиях в г. Москве по состоянию на 03.08.2010 года.
9. О санитарно-эпидемиологическом состоянии территорий, пострадавших от пожара, и мерах, принимаемых Роспотребнадзором, по состоянию на 4 августа 2010 года.
10. О санитарно-эпидемиологическом состоянии территорий, пострадавших от пожара, и мерах, принимаемых Роспотребнадзором, по состоянию на 5 августа 2010 года.
11. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Влияние лесных пожаров на работу фильтров КВОУ //Новое в российской электроэнергетике.2017. №3, с.34- 42.
12. Большая Советская Энциклопедия. Атмосфера Земли// Советская Энциклопедия. М, 1978.
13. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Влияние слоистости приземного слоя тропосферы на работу воздушных фильтров //Новое в российской электроэнергетике.2017. №7, с.30- 39.
14. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь. СПб.2008. с.335
15. Матвеев Е.Н. Опыт эксплуатации ГТЭ-20С//Тезисы доклада на 53 научно-технической сессии по проблемам газовых турбин РАН. 2006, с.153-154
16. Двухкрылые.// Энциклопедия “Кругосвет® “. 2001
17. Брокгауз Ф.А., Ефрон И.А. Комары. // Энциклопедия. www.dic.academic.ru
18. Перфильев П. П., Москиты //Фауна СССР. Насекомые, двукрылые, т. 3, М. — Л., 1966.
19. Жохов В.Л. Защита двигателей от двукрылых насекомых// Турбины и дизели, 2007, №1, с.20- 22.

20. Для чего сажали тополя в Москве? (<https://union-z.ru/articles/dlya-cheho-sazhali-topolya-v-moskve.html>).
21. Одуванчик ([https://ru.wikipedia.org/wiki/ Одуванчик](https://ru.wikipedia.org/wiki/Одуванчик)).
22. Жохов В.Л. Влияние ошибки проектирования на работу КБОУ ГТУ// Новое в российской электроэнергетике. 2019, № 5, с.22-30.
23. Жохов В.Л. Анализ принятых решений по выбору систем фильтрации воздуха ГТУ ТЭЦ//Энергетика. Экология. Экономика.2007, № 10 с.30-37.
24. Жохов В.Л. Модернизация комплексного воздухоочистительного устройства как вариант устранения ошибок проектирования// Новое в российской электроэнергетике. 2015.№ 2, с. 31-41.
25. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Сравнение работы комплексного воздухоочистительного устройства с односторонним всасом на ТЭЦ с ПГУ// Новое в российской электроэнергетике. 2018. № 3. С.24-32.
26. «Общие технические требования к системам фильтрации для энергетических газотурбинных установок» ОАО РАО «ЕЭС России» 2008.
27. Ртищеская краеведческая энциклопедия. <https://clck.ru/33YLcV>

Глава 3

1. «Общих технических требований к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок» РАО ЕЭС России. 2008.
2. Жохов В.Л. Правильный выбор воздушных фильтров – залог надежной работы газовых турбин ТЭЦ//Энергетика. Экономика. Экология. 2008, №13. с.24-31.
3. Жохов В.Л. Анализ принятых решений по выбору систем фильтрации воздуха ГТУ ТЭЦ// Энергетика. Экономика. Экология. 2007, №7. с.30-37.
4. Жохов В.Л., Савельев О.А. Анализ окружающей среды и факторов, влияющих на эксплуатацию ГТУ Сочинской ТЭС//Новое в российской электроэнергетике.2015, №8, с.35-47.
5. Маскрофт Ф. Статические и импульсные фильтры. Какие лучше? 2003. №8. с.24-28.
6. Жохов В.Л. Опыт освоения импульсных фильтров комплексных воздухоочистительных устройств ГТУ на ТЭС «Э.ОН Россия» // Новое в российской электроэнергетике.2014, №12, с.36-45.
7. Camfil Power Systems. Предотвращение загрязнений газотурбинных установок, эксплуатируемых в море// Газотурбинные технологии. Июнь 2014, с.10-14.
8. Комбинированная система фильтрации. Патент на полезную модель № 79802.

9. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Комбинированные системы фильтрации циклового воздуха для энергетических ГТУ// Газотурбинные технологии. 2020.№8. с.34-39.
10. Пчелкин В.В., Лисицина О.В., Подлегаев С.Н., Прокофьев Л.А., Сивков Д.И. Воздухоочистительные устройства- этапы развития//Газотурбинные технологии, 2007, № 3, с. 14-19.
11. Бурдюгов С.И, Пономарев А.В., Осокин М.Ю. Опыт эксплуатации ГПА в экстремальных условиях. Модернизация ГПА по выявленным замечаниям// Газотурбинные технологии. 2012. № 4. С.20-25.
12. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Опыт эксплуатации пластмассовых изделий систем фильтрации циклового воздуха энергетических установок// Газотурбинные технологии. 2018. №4. с.42-47.
13. ГОСТ 33366.1-2015 (ISO 1043-1:2011) Пластмассы. Условные обозначения и сокращения. Часть 1. Основные полимеры и их специальные характеристики.
14. Вольфсон С. А. АБС-пластик // Химическая энциклопедия: в 5 т / Гл. ред.: Кнунянц И. Л. (тт. 1—3), Зефирова Н. С. (тт. 4—5). — М.: Советская энциклопедия (тт. 1—2); Большая Российская энциклопедия (тт. 3—5), 1988—1998. — ISBN 5-85270-008-8.
15. ГОСТ 15150-69 “Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды”, ИПК Издательство стандартов, Москва.
16. ГОСТ 24622-91 (ИСО 2019/2-97) Пластмассы. Определение твердости. Твердость по Роквеллу.
17. ГОСТ 24621-91 (ИСО 868-85) Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору).
18. Устройство очистки воздуха (варианты). Патент № RU 145900 U1.
19. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Опыт эксплуатации фильтров - коагуляторов из пористого полиуретана//Газотурбинные технологии. 2017. №8, с.38-43.
20. На первом энергоблоке бывшей ГРЭС в Ивановской области произошел крупный пожар//Ивановские новости 11.10.2021.
21. Голов П.В., Жохов В.Л., Ленев С.Н. Новые рекомендации производителя КВОУ компании FAIST AIS для воздушных фильтров// Газотурбинные технологии.2017, № 1, с.10-13.
22. Голов П.В., Жохов В.Л., Ленев С.Н. Определение водостойкости фильтров-коагуляторов// Газотурбинные технологии.2017, № 3, с.26-31.

23. EN 20811 «Метод определения водостойкости. Испытание гидростатическим давлением», утвержденному в июне 1992 года.
24. ГОСТ ISO 139-2014. Материалы текстильные. Стандартные атмосферные условия для проведения кондиционирования и испытаний.
25. Жохов В.Л., Шрот Т., Канга М. Обеспечение качественной фильтрации воздуха для ГТУ// Газотурбинные технологии. 2007.№ 7, с.22-28.
26. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Проблемы карманных воздушных фильтров больших размеров при эксплуатации в КВОУ ГТУ//Газотурбинные технологии 2017. № 6. с.28-32.
27. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Анализ применения фильтров-коагуляторов на КВОУ энергетических ГТУ//Газотурбинные технологии 2021. № 1. с.10-15.
28. Freudenberg Filtration Technologies. Continuous gas turbine operation during heavy snow fall events. 2019.
29. Жохов В.Л. Ошибки выбора поставщиков воздухоприемных устройств ГТУ для отечественных ТЭЦ // Энергетика. Экология. Экономика.2007, №12, с.20-25.
30. Маскрофт Ф. Эксплуатационная стоимость воздушных фильтров для газовых турбин//Доклад на выставке «Нефть и газ» 2004.
31. Gore® Turbine Filters Flyer. More Power, Less Wear.10.12.2012
32. GORE® Turbine Filters keep fine particles, dirty water and salt out of gas turbines. Video. 2022 (clck.ru/33j5uG).
33. Technical Information Letter Air Intake Filters for FAIST GT Air Inlet Systems (TIL) 1451-0. Compact Cassette V-bank Filters Air Intake Filters.
34. Technical Information Letter Air Intake Filters for FAIST GT Air Inlet Systems (TIL) 1951-0. Air Intake Filters in General Environments.
35. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Какая защита фильтровального материала должна быть на кассетных фильтрах тонкой очистки КВОУ ГТУ? // Газотурбинные технологии. 2017, № 7, с.36-39.
36. Голов П.В., Жохов В.Л., Ленев С.Н. Сравнительный анализ воздушных фильтров тонкой очистки с вертикальной и горизонтальной укладкой фильтровального // Газотурбинные технологии. 2017, № 4, с.30-36.
37. Reference Specification for air intake systems for gas turbines of types SGTX-(SIL); SGTX-(ANN), Siemens.
38. Голов П.В., Жохов В.Л., Ленев С.Н. Испытания кассетных воздушных фильтров по методике компании FAIST// Газотурбинные технологии. 2017, № 2, с.26-31.

39. Жохов В.Л. Тестирование воздушных кассетных фильтров тонкой очистки на разрыв//Газотурбинные технологии. 2018, № 6, с.42-47.
40. Жохов В.Л. Тестирование воздушных фильтров FAIST на водостойкость и низкую температуру//Газотурбинные технологии. 2018, № 8, с.38-42.
41. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Мониторинг параметров циклового воздуха на всасе энергетической ГТУ с охладительными установками испарительного типа// Новое в российской электроэнергетике.2021, №2, с.6-19.

Глава 4

1. Eurovent 4/11 -2011
2. Жохов В.Л. Влияние энергоэффективности воздушных фильтров на выработку электроэнергии газотурбинных установок отечественных ТЭС//Новое в российской электроэнергетике. 2015, № 5, с.29-43.
3. <https://www.eurovent-certification.com>
4. Джанлука де Аркангелис. Комбинированные системы фильтрации воздуха ГТУ компании FAIST// Газотурбинные технологии.2021, №1, с.44-46.
5. Техническое Информационное Письмо компании FAIST от 22.02.2021. Компактные фильтры с монтажом в рамке - опыт внедрения»// Газотурбинные технологии.2021, №1, с.47.
6. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Отрицательная эффективность воздушных фильтров// Новое в российской электроэнергетике. 2018, №1, с.30-40.
7. Phillips B. A., Davis W. T. and Dever, M.// Investigation of the Effect of a Topically Applied Tackifier in Reducing Particle Bounce in a Melt-Blown Air Filter -Filtration & Separation, 1996, p. 933)
8. Qian Y., Willeke K., Ulevicius V. and Grinshpun S. A. //Particle Re-entrainment from Fibrous Filters -Aerosol Science and Technology, 27:3.
9. Kuehn T.H., Yang C. H. and Kulp R. H. //Effects of Fan Cycling on the Performance of Particulate Air filters used for IAQ Control -Indoor Air '96, The 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 4, p. 211.
10. Rivers R. D. and Murphy D. J.//Determination of Air Filter Performance under Variable Air Volume (VAV) Conditions -ASHRAE 675-RP: 1996.
11. F. Muscroft. The operational cost of gas turbine combustion air filters and real world filter performance.2005, 42 pp.
12. R. Bancroft. MHI 701F3 gas turbine air filter design review and improvement investigations. Report 2004, 16 pp.

13. Жохов В.Л. Повышение экономичности энергетических ГТУ с помощью высокоэффективных систем фильтрации воздуха//Энергетика. Экономика. Экология. 2007. № 4, с.20-27.
14. F. Muscroft. The operation cost of gas turbine combustion air filters. Report 2004, 62 pp.
15. Ф. Маскрофт. Влияние системы фильтрации на эксплуатационные расходы //Газотурбинные технологии. 2004. №8, с.2-6.
16. Жохов В.Л. Рейтинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ// Газотурбинные технологии.2019. №2.42-46.
17. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Модернизация КВОУ энергетических ГТУ с целью качественного мониторинга загрязненности воздушных фильтров по перепадам давления//Новое в российской электроэнергетике. 2021. №3. с.6-16.
18. <https://www.m24.ru/news-> Агентство “Москва”.
19. Жохов В.Л., Шрот Т., Канга М. Обеспечение качественной фильтрации воздуха ГТУ // Газотурбинные технологии. 2007. № 7. С. 22–28.
20. Жохов В.Л. Общие правила (здравый смысл) при выборе оптимальной системы фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ//Газотурбинные технологии. 2019. № 6. С. 34–38.
21. Слейд С., Палмер К. Мировой рынок газовых турбин. Прогноз развития // Газотурбинные технологии.2018. № 8. С.22-27.
22. Жохов В.Л. Модернизация комплексного воздухоочистительного устройства как вариант устранения ошибок проектирования// Новое в российской электроэнергетике. 2015. № 2. С-31-40.
23. Schirmeister U., Mohr F. Impact of enhanced GT air filtration on power output and compressor efficiency degradation // Proc. ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT 2016. South Korea, June 13–17, 2016, P. 1–14
24. Siemens Industrial Turbomachinery AB. Product Improvement Bulletin. Improvement of Air inlet filter Efficiency. 2010-03-12.
25. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Влияние лесных пожаров на работу фильтров КВОУ ГТУ// Новое в российской электроэнергетике. 2017. № 3. С.34-42.
26. Жохов В.Л. Опыт эксплуатации противомоскитных сеток на КВОУ ГТУ// Газотурбинные технологии.2018. № 5. С.34-39.
27. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
28. Федотов А. В., Скабкин Н. Г. Основы теории надежности и технической диагностики (конспект лекций). Омск Издательство ОмГТУ, 2010. 61с.

29. Жохов В.Л. Тестирование воздушных кассетных фильтров тонкой очистки КВОУ ГТУ на разрыв// Газотурбинные технологии.2018. № 6. С.42-47.
30. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Какая защитная сетка фильтровального материала должна быть на кассетных фильтрах тонкой очистки КВОУ ГТУ? // Газотурбинные технологии.2017. № 7. С.36-39.
31. Жохов В.Л., Ленев С.Н. О необходимости включения требования по определению водостойкости воздушных фильтров в стандарт//Новое в российской электроэнергетике. 2019. № 2. С.16-24.
32. ГОСТ 15150-69 “Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды”.
33. Жохов В.Л. Низкотемпературные испытания воздушных фильтров// Газотурбинные технологии. 2018. № 1. С.40-44.
34. Голов П.В., Жохов В.Л., Ленев С.Н. Испытание кассетных воздушных фильтров по методике компании FAIST// Газотурбинные технологии 2017. № 2. С.26-31.
35. П.В. Голов, В.Л. Жохов, С.Н. Ленев. Определение водостойкости фильтров - коагуляторов// Газотурбинные технологии 2017. № 3. с.26-33.
36. Природа Москвы. www.ru.wikipedia.org
37. Жохов В.Л. Входной контроль кассетных фильтров тонкой очистки типа MV и MVX// Газотурбинные технологии 2019. № 4. С.36-40.
38. Siemens AG. Reference Specification for air intake systems for gas turbines of types SGTX-(SIL); SGTX-(ANN). 2005-02-09.
39. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Результаты входного контроля кассетных фильтров тонкой очистки версии МРК// Газотурбинные технологии 2018. № 3. с.38-43.
40. Рингстром Р. Новое поколение высокоэффективных воздушных фильтров снижает простои и увеличивает вырабатываемую мощность//Газотурбинные технологии. 2013., №8, с.34-35.
41. www.camfil.com. 2021-10-06
42. Camfil Power Systems: модернизация системы фильтрации воздуха экономически и технологически выгодна//Газотурбинные технологии.2021. № 5.с.34-36.
43. FAIST Anlagenbau GmbH. GAS TURBINES & TURBO MACHINERY FILTERS. www.faist.de
44. FAIST Anlagenbau GmbH. 600mm deep V bank filters Vs shorter filters. 02.10.2021

45. Siemens Energy. Implementation of high capacity filters in high dust-load environments. October 1, 2021.
46. Mikropor. MVZ series/6000 mm. <https://www.mikropor.com/tr>.
47. ГОСТ Р 53791-2010. Национальный стандарт Российской Федерации. Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Общие положения".
48. Жохов В.Л. Сравнительный анализ жизненного цикла систем фильтрации циклового воздуха ГТУ в различных климатических условиях// Газотурбинные технологии.2021. № 1. с.34-38.
49. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Влияние лесных пожаров на работу фильтров КВОУ ГТУ// Новое в российской электроэнергетике. 2017. № 3. С.34-42.
50. Жохов В.Л. Методика расчета эксплуатационных затрат на систему фильтрации циклового воздуха, промывку компрессора и недовыработку мощности ГТУ// Газотурбинные технологии.2019. № 5. с.36-41.
51. Ляхов Ю.А. Правовая неопределенность в уголовном судопроизводстве. http://www.juristlib.ru/book_5510.html
52. Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок. РАО «ЕЭС России». 2007 (Жохов В.Л., Лебедев А.С., Львов М.Ю., Михайлов В.Е.).
53. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Технические требования к воздушным фильтрам для комплексных воздухоочистительных устройств энергетических газотурбинных установок// Новое в российской электроэнергетике.2019. № 9. с.11-21.
54. Архив Гидрометеоцентра России. <https://meteoinfo.ru/archive-pogoda>
55. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуальная версия СНиП 23-01-99. М: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2015.
56. Курганов А.М. Таблицы параметров предельной интенсивности дождя для определения расходов в системах водоотведения. Справочное пособие. М.: Стройиздат, 1984.
57. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85 (с Изменением № 1). М.: Министерство регионального развития Российской Федерации, 2012.

Оглавление

Обращение к читателю

Вместо введения

Краткая историческая справка

Глава 1. Основные понятия и принципы фильтрации воздуха

1.1. Основные понятия

1.2. Принципы теории фильтрации

1.3. Анализ стандартов и ГОСТ, регламентирующих требования к воздушным фильтрам

1.3.1. Стандарты для тестирования высокоэффективных фильтров

1.3.2. Стандарты для тестирования фильтров общего назначения и для систем вентиляции

1.3.3. Стандарт для воздушных фильтров, используемых в роторных механизмах

Глава 2. Источники загрязнений окружающей среды

2.1. Природные источники загрязнений

2.1.1. Вулканы, песчаные и пылевые бури

2.1.2. Пожар

2.1.3. Слоистость приземного слоя тропосферы

2.1.4. Ледяной дождь

2.1.5. Цветение растений и размножение двукрылых насекомых

2.1.6. Пернатые

2.2. Рукотворные источники загрязнений

2.2.1. Ошибки проектных решений по размещению оборудования

2.2.2. Не оптимальные проектные решения ВЗТ для энергетических ГТУ

2.2.3. Человеческий фактор, влияющий на эффективность очистки воздуха ГТУ

Глава 3. Системы фильтрации циклового воздуха ГТУ

3.1. Импульсные системы очистки воздуха энергетических ГТУ

3.2. Статические системы очистки воздуха энергетических ГТУ

3.2.1. Комбинированные системы фильтрации

3.2.2. Фильтры коагуляторы Poret

3.2.3. Панельные и карманные фильтры коагуляторы

3.2.4. Карманные фильтры

3.2.5. Картриджные, конусные и «чулочные» фильтры

3.2.6. Кассетные фильтры

Глава 4. Требования к системам фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ

4.1. Энергоэффективность воздушных фильтров

4.2. Реверсное крепление кассетных фильтров

4.3. Отрицательная эффективность воздушных фильтров

4.4. Высокоэффективные системы фильтрации воздуха

4.5. Рейтинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ

4.6. Модернизация КВОУ энергетических ГТУ с целью качественного мониторинга загрязненности воздушных фильтров по перепадам давления

4.7. Общие правила (здравый смысл) при выборе оптимальной системы фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ

4.8. Входной контроль воздушных фильтров для энергетических ГТУ

4.9. Увеличение жизненного цикла финишных фильтров КВОУ ГТУ

4.10. Выбор системы фильтрации циклового воздуха энергетической ГТУ

4.11. Технические требования к воздушным фильтрам КВОУ энергетических ГТУ

4.12. Техническое задание на закупку воздушные фильтры для КВОУ ГТУ

Список литературы по главам



Жохов Владимир Леонидович,
кандидат технических наук, доцент,
эксперт ПАО «Мосэнерго»



Бюлент Аккайя, руководитель компании
«Элба Фильтр Мануфактуринг Рус»

ISBN 978-5-6045651-1-7



9 785604 565117 >