

Жохов В.Л., Аккайя Б.



Воздушные фильтры для энергетических ГТУ

Издательский дом
«Газотурбинные технологии»
2023

Жохов В. Л., Аккайя Б.

Воздушные фильтры для энергетических ГТУ

Рыбинск
ИД «Газотурбинные технологии»
2023

УДК 62–733

ББК 31.16

Ж82

Жохов В. Л., Аккайа Б.

Ж82 Воздушные фильтры для энергетических ГТУ. — Рыбинск, ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2023. — 336 с.
ISBN 978–5–6045651–1–7

В книге представлены результаты многолетних исследований систем фильтрации комплексных воздухоочистительных устройств (КВОУ) энергетических ГТУ, выполненных авторами в различных регионах нашей страны и за рубежом. Проанализированы действующие ГОСТы и зарубежные стандарты, классифицирующие воздушные фильтры для различного применения. Показаны результаты разработанной системы мониторинга загрязнения циклового воздуха энергетических ГТУ и воздушных фильтров КВОУ. Даны рекомендации по выбору систем фильтрации воздуха для энергетических систем. Разработаны требования к системам фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ.

Авторы выражают глубокую признательность Фрэнку Маскрофту (Австралия) за его ценные советы в процессе работы над подготовкой рукописи книги и заместителю управляющего директора – главному инженеру ПАО «Мосэнерго» С. Н. Ленёву за многолетнюю помощь в проведении исследований систем фильтрации КВОУ энергетических ГТУ.

УДК 62–733

ББК 31.16

ISBN 978–5–6045651–1–7

© В. Л. Жохов, Б. Аккайа, 2023

© ИД «Газотурбинные технологии», 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

К читателю	5
Вместо введения	6
Краткая историческая справка	9
Глава 1. Основные понятия и принципы фильтрации воздуха	12
1.1. Основные понятия	12
1.2. Принципы теории фильтрации	22
1.3. Анализ стандартов и ГОСТ, регламентирующих требования к воздушным фильтрам	31
1.3.1. Стандарты для тестирования высокоэффективных фильтров.....	32
1.3.2. Стандарты для тестирования фильтров общего назначения и для систем вентиляции.....	36
1.3.3. Стандарт для воздушных фильтров, используемых в роторных механизмах.....	43
Глава 2. Источники загрязнений окружающей среды	53
2.1. Природные источники загрязнений.....	55
2.1.1. Вулканы, песчаные и пыльные бури	55
2.1.2. Пожары.....	57
2.1.3. Слоистость приземного слоя тропосферы.....	64
2.1.4. Ледяной дождь.....	72
2.1.5. Цветение растений и двукрылые насекомые.....	73
2.1.6. Пернатые	81
2.2. Рукотворные источники загрязнений.....	84
2.2.1. Ошибки проектных решений по размещению оборудования	84
2.2.2. Неоптимальные проектные решения ВЗТ для энергетических ГТУ.....	95
2.2.3. Человеческий фактор, влияющий на эффективность очистки воздуха ГТУ	105
Глава 3. Системы фильтрации циклового воздуха ГТУ	108
3.1. Импульсные системы очистки воздуха энергетических ГТУ ..	108
3.2. Статические системы очистки воздуха энергетических ГТУ... ..	120
3.2.1. Комбинированные системы фильтрации	122
3.2.2. Фильтры-коагуляторы Poret	136
3.2.3. Панельные и карманные фильтры-коагуляторы	144
3.2.4. Карманные фильтры	156
3.2.5. Картриджные, конусные и «чулочные» фильтры	168
3.2.6. Кассетные фильтры.....	172
Глава 4. Требования к системам фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ	215

4.1. Энергоэффективность воздушных фильтров.....	215
4.2. Реверсное крепление кассетных фильтров.....	220
4.3. Отрицательная эффективность воздушных фильтров	223
4.4. Высокоэффективные системы фильтрации воздуха	229
4.5. Рейтинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ	237
4.6. Модернизация КВОУ энергетических ГТУ с целью качественного мониторинга загрязненности воздушных фильтров по перепадам давления	244
4.7. Общие правила (здравый смысл) при выборе оптимальной системы фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ.....	251
4.8. Входной контроль воздушных фильтров для энергетических ГТУ	258
4.9. Увеличение жизненного цикла финишных фильтров КВОУ ГТУ	278
4.10. Выбор системы фильтрации циклового воздуха энергетической ГТУ	286
4.11. Технические требования к воздушным фильтрам КВОУ энергетических ГТУ	293
4.12. Техническое задание на закупку воздушных фильтров для КВОУ ГТУ	310
Список литературы по главам	320

*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 ещё важнее делать практические шаги в направлении ее решения. Воздушные фильтры являются тем техническим средством, которое позволяет минимизировать негативное влияние различного вида загрязнений на человеческий организм.

Неменьший урон загрязнение атмосферного воздуха оказывает и на энергетический сектор страны, хотя сама энергетика также 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 высших учебных заведений энергетических специальностей.

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 В. Л. Жохову)

Чего хочет или в чём нуждается клиент?

Если спросить клиента или производителя (фирму-изготовителя) оборудования, чего они хотят, ответ, возможно, будет «что-нибудь типа М5/Ф7-8» (как в твоём случае). Но действительно ли это то, чего они хотят? В 99,99 % случаев клиент не имеет представления, а М5/Ф7-8 – 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 (М5/Ф7-8), 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 М5/Ф7-8 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 больше 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 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 промывкой. Промывка же 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.). 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 месяцев.

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 пред-

ставление 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, 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 ф. ст. для GE 9F фильтры H10 сэкономят дополнительно 500 ф. ст. в год в угольных эмиссиях по сравнению с F8-фильтрами, и это только благодаря прибыли от средней эффективности, поскольку возросшая эффективность компрессора уменьшает потребление топлива на каждый мегаватт-час 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 углеводорода (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 двух 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 в этом случае отключение установки на время промывки 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 упомяну, что рассматривал здесь лишь уровень тонкой фильтрации, т. к. уровень предфильтрации 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 подходил бы в любом случае), если только это, скажем, не H10 или H13 для установок, 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 фильтров H10 или H13 незначительна по сравнению с экономией на топливе, выработке электроэнергии и эмиссии CO₂.

Надеюсь, это пригодится для твоей полемики.

Фрэнк Маскрофт

*Народ, не знающий своего прошлого,
не имеет будущего.*

М. В. Ломоносов

Краткая историческая справка

Еще несколько 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. И1*.

В воздухозаборной камере установлены фильтры, которые образуют фильтрующие устройства для газотурбинной установки. Фильтры рулонные марки ФРНК-1 (нетканое клееное фильтровальное полотно толщи-



а)

	
ОАО КОВРОВО-СУКОМНАЯ ФИРМА «КОВРОТЕКС» г. Димитровград Ульяновской области	
Полотно клееное, объемное, фильтрующее марки ФРНК-1	
Артикул	СФ- ДК-4
ТУ 8397-126-00322318-97	
Ширина полотна, см	143
Состав сырья: % - хим. вол. - 100	
Номер рулона	1912
СОРТ 1	
Номер партии	98
Условные вырезы	
Длина полотна, м	1x0,3
Колич. отрезов в рулоне	321 п.м 55,4 кв.м
Вес рулона, кг 15	
Поверх. плотн., г/м² 290±30	
Свободная отпускная цена	
Дата изготовления:	2008 2003 г.
Номер контролера	
Упаковщик	2
Агрегат	УИ-3
Пом. мастера	Степанов
Печать РМА «ДИАМ» Лис. ПД №7-0120. Зак. №1053. Тираж 4000 шт.	

б)

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

ной 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 .

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. И2а). На верхних и нижних частях стенок каркасов установлены разъемные подшипники для укладки в них осей катушек с фильтрующим материалом, причем съемные 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.



а)



б)

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

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. И2б).

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

Другой способ очистки воздуха для ГТУ-150 показан на рис. И3.

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 мелко-дисперсной 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.



а)



б)

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

*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 л воды и вдыхает 15 кг воздуха. Соотношение в приоритетах суточных потребностей человека наглядно показывает *рис. 1.1.*



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

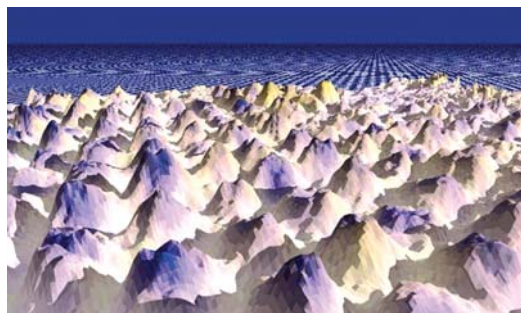


Рис. 1.2. Фото атомов углерода под электронным микроскопом (<https://clck.ru/33Rksn>)

Без воды и пищи человек может прожить несколько дней, без воздуха – несколько минут. Такую аналогию можно применить и к любому оборудованию, рабочим телом которого является атмосферный воздух. Без кислорода невозможен процесс горения, а следовательно, и совершенные 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 отчету № 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 в организм человека с каждым вдохом попадают более 25 млн частиц.

Еще 150 лет назад немецкий химик Макс фон Петтенкофер считал «плохой воздух» негативным фактором при долгом пребывании 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]. При её превышении проявляются симптомы

плохого самочувствия, такие, как головная боль, усталость и потеря внимания.

В качестве примера воздействия CO_2 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 CO_2 в учебных классах прямо влияет на посещаемость учеников. Повышение концентрации CO_2 до 1000 ppm ведёт к снижению посещаемости на 10–20 %. Согласно другому исследованию, каждые лишние 100 ppm CO_2 снижают годовую посещаемость учеников на 0,2 %. Также было установлено, что повышение кратности вентиляции может снизить отсутствие по болезни на 10–17 %. Так CO_2 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 различий:

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, иными 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. В среднем она имеет показатель 5 % (по весу), из-за того что внутри помещения циркуляция свежего воздуха слабая [3].

Пыль, содержащаяся в атмосферном воздухе

За последние годы в разных странах мира проведены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования в отношении загрязняющих веществ, содержащихся в атмосферном воздухе, с целью определения их химического состава, распределения 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 группа называется стадией образования ядра и представлена частицами размером от 0,001 до 0,3 мкм с пиковой концентрацией 0,013 мкм. Вторая охватывает диапазон частиц размеров от 0,03 до 4 мкм с пиковой концентрацией 0,069 мкм и называется стадией аккумуляции. Третья – 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 *рис. 1.3*.

Следует отметить, что количество крупнодисперсных частиц незначительно по сравнению с частицами меньшего размера. Однако эта ситуация существенно меняется в зависимости от того, как осуществляется или измеряется распределение частиц: по количеству, площади поверхности или массе (объему). Исследования показали, что частицы небольшого размера несущественны, когда во внимание принимается объем (вес). В то же 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 заг-

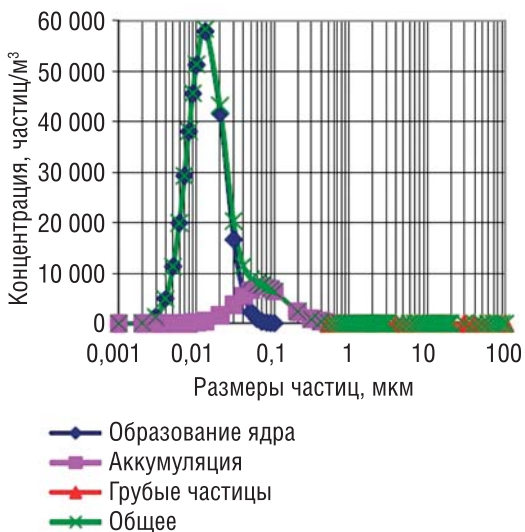


Рис. 1.3. Теоретическое распределение пыли по количеству в атмосферном воздухе [4]

разнение проточной части ГТУ. Каждая группа частиц делится на дополнительные категории: основные и второстепенные. Основные частицы попадают в атмосферу уже сформировавшись. 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 ядрами 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, 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 *рис. 1.4* представлено сравнение теоретического распределения частиц атмосферной пыли по площади и результаты исследования пыли профессором К. Т. Уитби (К. Т. Whitby) [5].

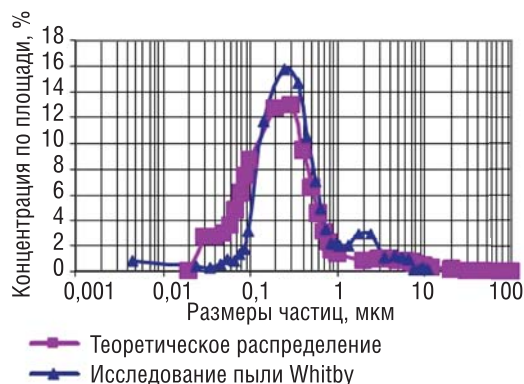


Рис. 1.4. Сравнение воздушной пыли по площади

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 ядровых и аккумулятивных частиц. И теоретическое распределение частиц по пло-

щади, 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 *рис. 1.5* представлено процентное распределение частиц пыли различной дисперсности в реальном атмосферном воздухе (по данным профессора Уитби 1958 года) [5].

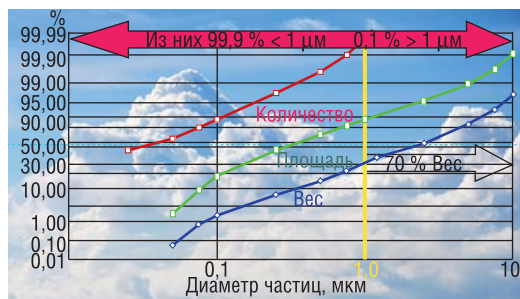


Рис. 1.5. Процентное содержание частиц пыли в атмосферном воздухе

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 масса 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 (*табл. 1.1*) [3].

Концентрация типичной атмосферной пыли

Таблица 1.1

Местность	Диапазон температур, °С	Концентрация пыли, мг/м ³	Диапазон размеров частиц, мкм
Побережье и море	−20...+30	0,01...0,3	0,003...5,000
Города и электростанции	−20...+45	0,03...0,3	0,003...10
Тяжелая промышленность	−20...+45	0,1...10,0	0,003...2000
Сельская местность	−20...+40	0,01...0,1	0,003...3,0
Пустыни и песчаные бури	−5...+45	0,01...700	0,003...2000
Тропики	+5...+40	0,01...0,3	0,003...10
Арктика	−50...+5	0,01...0,3	0,003...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 I кв. 2020 года (РБК от 25.05.2020) по результатам анализа компании Finexpertiza, сделанного на основе данных Росгидромета, уровень загрязнения воздуха стал рекордным за последние пять лет (наблюдения ведутся с 2015 года). В этот период 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 с каждым вдохом в организм человека попадают более 25 млн частиц. 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. По стандарту ISO 16890 «Воздушные фильтры для общей вентиляции» размеры «твердых частиц» обозначаются РМ (общее количество взвешенных в воздухе твердых частиц размером меньше 10; 2,5 и 1 мкм, выраженное в мкг/м³).

На рис. 1.7 показано влияние размера частиц в воздухе на здоровье человека. Установлено, что чем меньше размер, тем больший вред здоровью наносится частицами. Наиболее опасные частицы PM_{10} .

По оценкам Всемирной организации здравоохранения, в Европе с воздействием частиц связано 800 тыс. преждевременных смертей в год [8]. Уменьшение концентрации $PM_{2,5}$ на 10 мкг/м^3 приводит к увеличению продолжительности жизни на $0,61 \pm 0,2$ года.



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

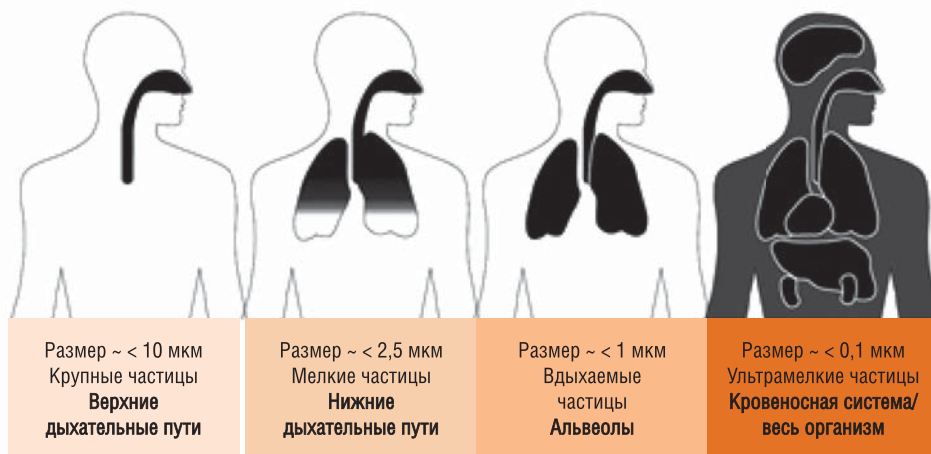


Рис. 1.7. Влияние размера частиц на здоровье человека (<https://clck.ru/33RT2R>)

Сопоставляя человеческий организм с «организмом» ГТУ, логично будет рассмотреть влияние размеров частиц пыли наружного воздуха на работу турбомашин. 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 топливе, образовав соединения, которые могут вызвать коррозию деталей машины и уменьшить срок их эксплуатации (рис. 1.8б).

И только очень маленькие частицы, чаще размером меньше 1 мкм, могут образовать загрязняющий слой на лопатках компрессора и в охлаждающих каналах, влияя таким образом на надежность и эффективность ГТУ, снижая её мощность (рис. 1.8 в, г). Эти частицы 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.

Загрязнения обычно появляются большей частью на первых ступенях компрессора, наиболее перегруженных в современных ГТУ. Даже не-

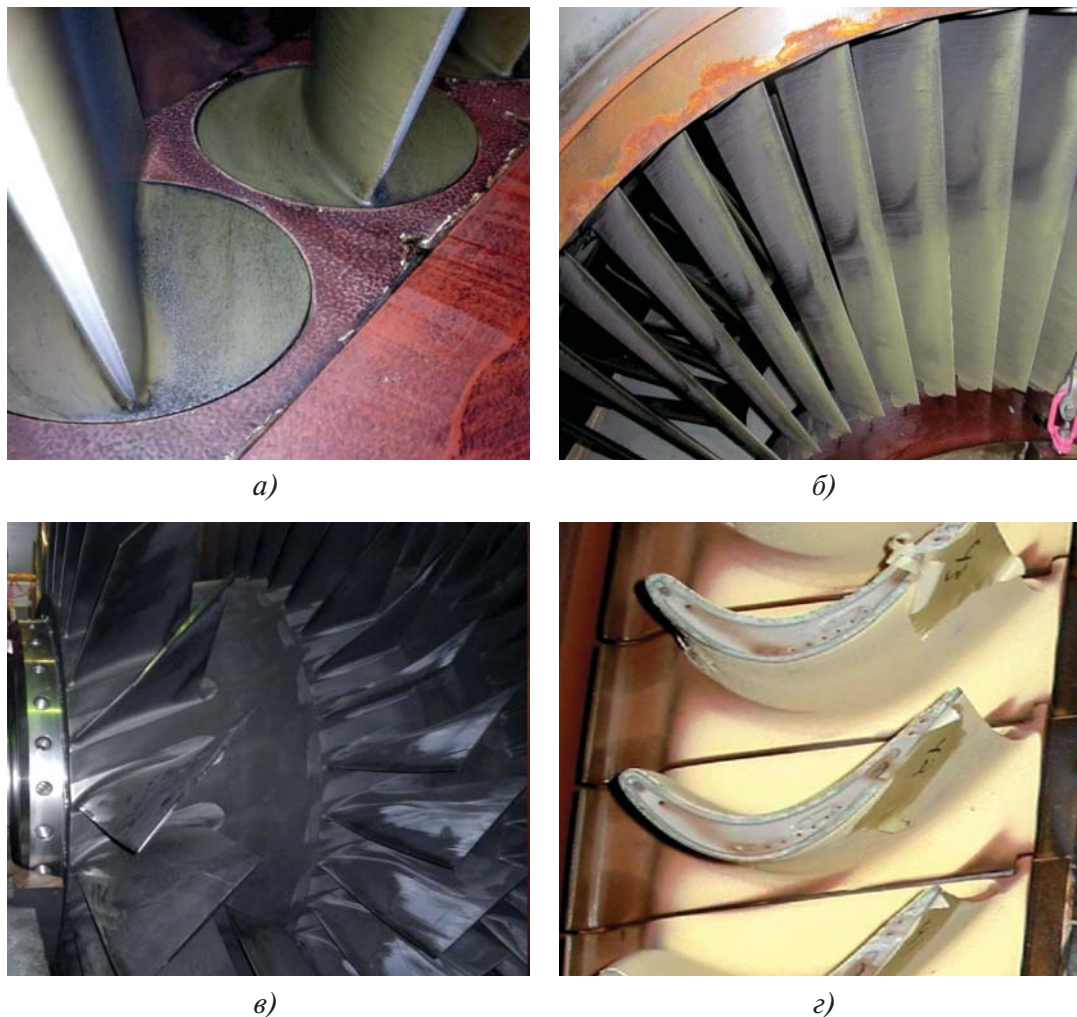


Рис. 1.8. Лопатки ГТУ: а) эрозия кромок лопаток, б) коррозия, в) загрязнение осевых компрессоров, г) загрязнение каналов охлаждения лопаток газовой турбины

большие отложения частиц на лопатках первой ступени 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. Таким образом данное явление прогрессирует по всему компрессору до последней ступени. Если снижение расхода воздуха значительно, то на одной из ступеней компрессора может возникнуть вращающийся срыв потока, а затем помпаж [10], что может привести к разрушению лопаток (рис. 1.9).



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.

Такая 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») непригодны для очистки циклового воздуха энергетических ГТУ.

1.2. Принципы теории фильтрации

Для очистки атмосферного воздуха от различных загрязняющих веществ используются разнообразные системы фильтрации на основе матерчатых фильтров, которые в зависимости от эффективности очистки разделяются на три основные группы: низко-, средне- 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 фильтр-элементов. В первую подгруппу попадают фильтры, в которых предусмотрена самоочистка импульсом обратного движения воздуха (импульсные самоочищающиеся фильтры), вторая подгруппа — 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. Проще говоря, 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, она подходит только 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. Это отсеивание (просачивание), инерция (столкновение), перехват, диффузия и электростатический заряд (притяжение). Первые четыре 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_3 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:

$$\eta_3 = F_{\Pi} / F_1 \quad (1.1).$$

Для аналитического определения коэффициента захвата любого механизма необходимо использовать данные о поле скоростей при обтекании фильтрующего элемента. Такие данные имеются только для тел простейшей формы: шара и цилиндра. В большинстве случаев коэффициент захват определяется 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 *рис. 1.10 – 1.13* [12].

Эффект отсеивания (просачивания)

Задерживаются частицы 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)

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 на-

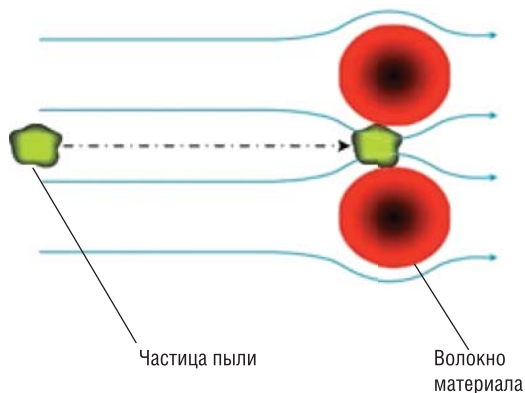


Рис. 1.10. Механизм отсеивания

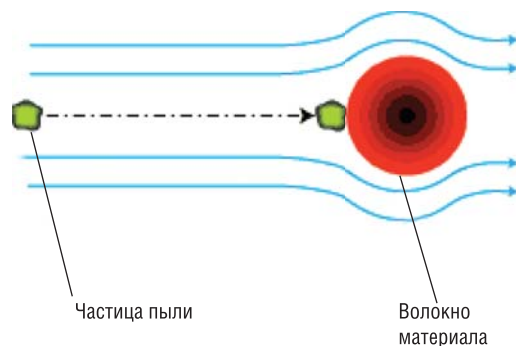


Рис. 1.11. Механизм столкновения

растания 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:

$$Stk = v_0 d_u \rho_u C_k / (18 \mu_0 d_e), \quad (1.2)$$

где d_u – диаметр частицы пыли; ρ_u – плотность частиц; d_e – 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.

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

Эффект перехвата (касания)

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:

$$\eta_r = \frac{R^2}{1 - \ln Re_T}, \quad (1.9)$$

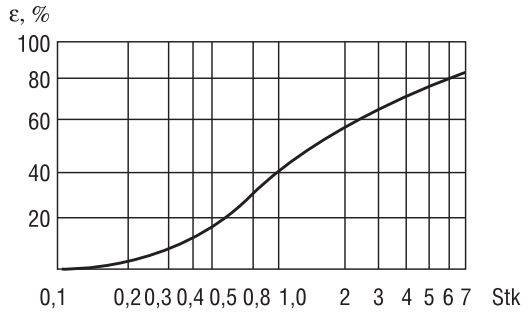


Рис. 1.12. Примерная зависимость эффективности улавливания частиц пыли от критерия Стокса

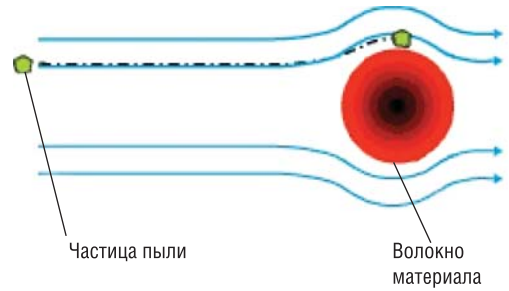


Рис. 1.13. Механизм перехвата

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

где $\text{Re}_T = \frac{d_T v_0 \rho_0}{\mu_0}$ – 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

Частицы малой массы не следуют линиям потока воздуха вокруг волокна фильтра. Их хаотичное движение (известное как броуновское) 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 удержать. 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.

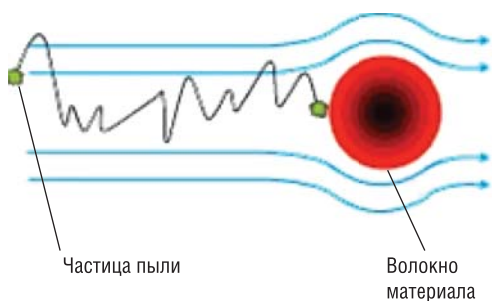


Рис. 1.14. Механизм диффузии

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

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

где Pe – критерий Пекле, характеризующий относительную роль конвекции и диффузии в подводе частицы к поверхности цилиндра и вы-

воде 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 зрения многие фильтры, например войлочные и фильтры с длинноволокнистой средой, оказываются непригодными.

Факторы, влияющие на эффективность механического захвата

Таблица 1.2

Эффект фильтрации	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

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

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

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.

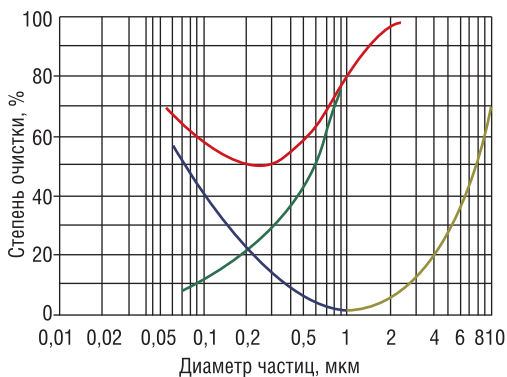


Рис. 1.15. Влияние эффектов механического захвата частиц на степень очистки: — эффект перехвата; — эффект диффузии; — (продолжение синей) — эффект инерции; — общая эффективность очистки

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]:

$$\eta'_E = \frac{\delta E_0^2 r^2}{6w\mu r_0} \quad (1.12)$$

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 – 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 используются 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 стекловолокна и синтетических материалов [12].

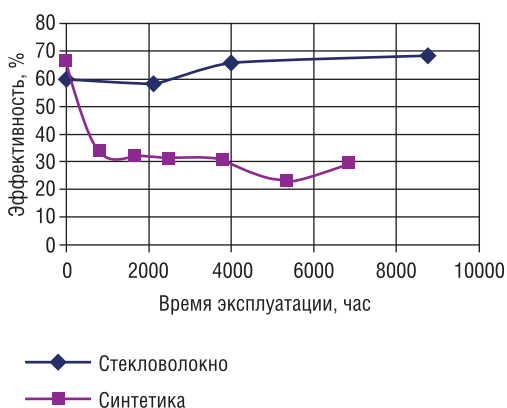


Рис. 1.16. Эксплуатационные параметры синтетических и стекловолоконных фильтров класса F7 с использованием частиц размером 0,4 мкм

Как видно из представленных графиков, эффективность стекловолоконного фильтра 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 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. Считается, 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).

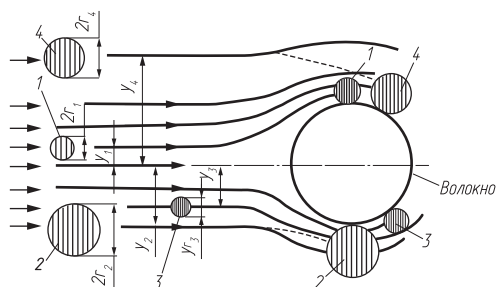


Рис. 1.17. Схема движения частиц аэрозоля при обтекании одиночного волокна: 1 – механизм касания; 2 – инерционный механизм; 3 – диффузионный механизм; 4 – электростатический механизм (<https://clck.ru/33SQes>)

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.

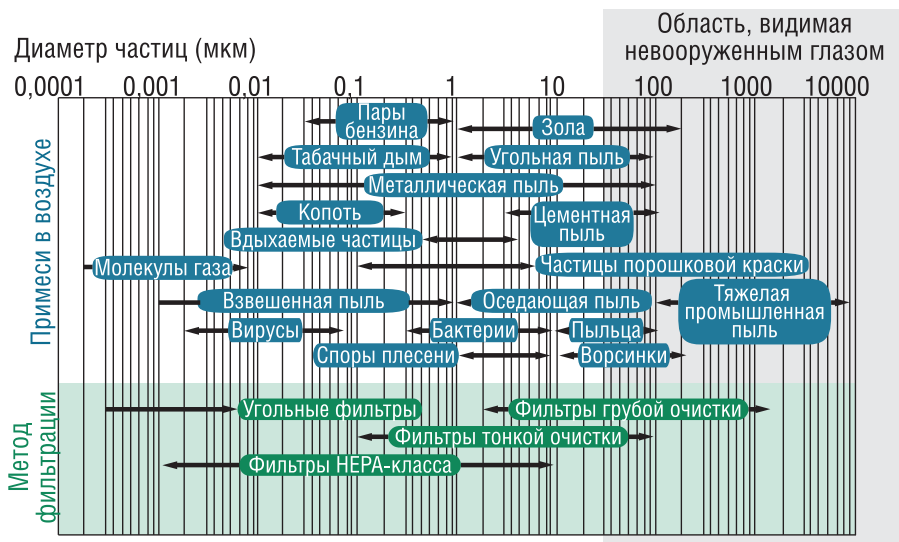


Рис. 1.18. Различные виды частиц в воздухе и фильтры для их удаления (<https://clck.ru/33SUMr>)

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.

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 осевшими 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):

$$\Delta p = k_c \mu_0 v_0 G(1 - m_n) / (d_q^2 m_n^3 \rho_q), \quad (1.14)$$

где k_c – коэффициент, принимаемый для пыли с диаметром частиц $d_{\text{ч}} < 6$ мкм равным 240; G – масса пыли, содержащейся в порах фильтровального материала, отнесенная к единице площади фильтра; $m_{\text{п}}$ – пористость слоя пыли, $m_{\text{п}} = (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{н}})/\rho_{\text{ч}}$, здесь $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц; $\rho_{\text{н}}$ – плотность насыпного слоя; $d_{\text{ч}}$ – диаметр частиц пыли.

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.

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.

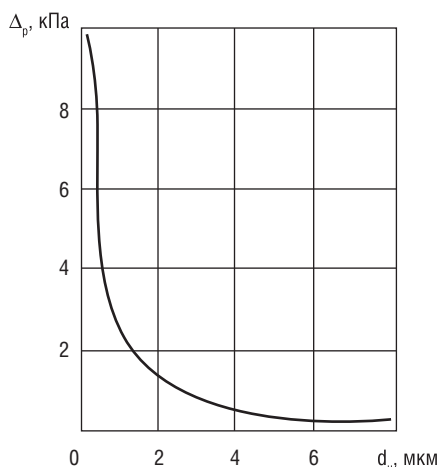


Рис. 1.19. Изменение гидравлического сопротивления слоя пыли толщиной 1 мм в зависимости от дисперсности. Скорость фильтрации $W = 1$ м/мин (<https://clck.ru/33SQnr>)

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

Второе десятилетие XXI века ознаменовалось выходом в свет нескольких новых стандартов, устанавливающих требования к воздушным фильтрам и определяющих их классификацию. Каждый из них устанавливает свои методы тестирования фильтр-элементов. Инженерному персоналу энергетических компаний порой бывает затруднительно

разобраться в многообразии и особенностях этих стандартов. Проанализируем их назначение 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 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 переклассифицированы 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.

В Российской Федерации 29.12.2010 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 от ISO 15 E до ISO 75 U (рис. 1.20).

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.



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

Классификация фильтров по ISO 29463

Таблица 1.3

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

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 стандарту ISO 29463, частей 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, стандарт EN 1822-1 предусматривает только четыре (табл. 1.4).

Сравнение методов тестирования фильтров по ISO 29463 и EN 1822

Таблица 1.4

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	
Тест на протечку «масляной нитью»	
Тест на эффективность удержания частиц размером от 0,3 до 0,5 μm	Тест на эффективность удержания частиц размером от 0,3 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)

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 применяются редко.

Различия между EN 1822 и ISO 29463

Как было указано выше, ISO 29463 охватывает группы фильтров 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).

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 его классификации по стандарту EN 1822. Более того, ISO 29463 начинается с группы фильтров ISO 15E, что эквивалентно классу фильтра E11 согласно стандарту 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).

Сравнение между классами фильтров по ISO 29463 и EN 1822**Таблица 1.5**

Группы фильтров по EN 1822	Группы фильтров по ISO 29463	Общая величина		Местная величина	
		Эффективность, %	Проникновение, %	Эффективность, %	Проникновение, %
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

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

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. Он 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.

Стандарт устанавливает требования к фильтрам с начальной эффективностью менее 98 % для частиц размером 0,4 мкм.

В новом стандарте и ГОСТ изменена классификация фильтров, использовавшаяся 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 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 эффективность фильтр-элемента должна определяться в два этапа: первоначально проводится испытание нового заводского фильтра, затем фильтр обрабатывают изопропанолом для снятия электростатического заряда, и только после этого проводится 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 течение 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.

Первого 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. Первого января 2023 года в нашей стране был введен Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 70064-2022 «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 все уже 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 вызывало 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);
- классификацию 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).

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

Согласно ISO 16890 (ГОСТ Р 70064-2022), оценка фильтра будет выглядеть, к примеру, как ISO *ePM*₁₀ 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 *ePM*₁ для диапазона частиц до 1 мкм и *ePM*_{2,5} для частиц до 2,5 мкм.

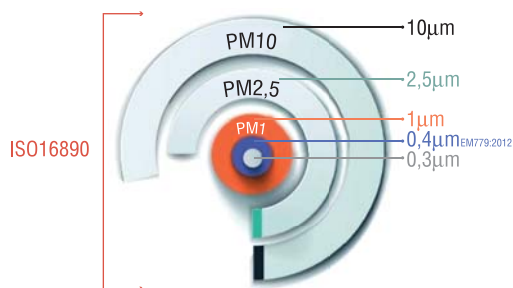


Рис. 1.21. Взаимосвязь размеров PM и мкм (µm) [19]

Сравнение стандартов ГОСТ Р ЕН 779:2014 и ГОСТ Р 70064-2022 Таблица 1.6

Обозначения	ГОСТ Р ЕН 779:2014	ГОСТ Р 70064-2020
Размер частиц для классификации, мкм	0,4	0,3–1 (PM ₁) 0,3–2,5 (PM _{2,5}) 0,3–10 (PM ₁₀)
Тестовый аэрозоль	DEHS (диэтилгексилсебацинат)	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, мг/м ³	70	140
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 ePM ₁₀ ISO ePM _{2,5} ISO ePM ₁

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 пылезадерживающая 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).

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).

Классификация фильтров по стандарту ISO 16890

Таблица 1.7

Классификация PM ₁	Классификация PM _{2,5}	Классификация PM ₁₀	Фильтры грубой очистки
ePM ₁ [95 %]	ePM _{2,5} [95 %]	ePM ₁₀ [95 %]	Пылезадерживающая способность с 5 %-ным интервалом начиная с 5 %
ePM ₁ [90 %]	ePM _{2,5} [90 %]	ePM ₁₀ [90 %]	
ePM ₁ [85 %]	ePM _{2,5} [85 %]	ePM ₁₀ [85 %]	
ePM ₁ [80 %]	ePM _{2,5} [80 %]	ePM ₁₀ [80 %]	
ePM ₁ [75 %]	ePM _{2,5} [75 %]	ePM ₁₀ [75 %]	
ePM ₁ [70 %]	ePM _{2,5} [70 %]	ePM ₁₀ [70 %]	
ePM ₁ [65 %]	ePM _{2,5} [65 %]	ePM ₁₀ [65 %]	
ePM ₁ [60 %]	ePM _{2,5} [60 %]	ePM ₁₀ [60 %]	
ePM ₁ [55 %]	ePM _{2,5} [55 %]	ePM ₁₀ [55 %]	
ePM ₁ [50 %]	ePM _{2,5} [50 %]	ePM ₁₀ [50 %]	
Требования: > 50 % начальная эффективность; > 50 % эффективность разряженного фильтра		Требования: > 50 % начальная эффективность; Нет требований по разряжению	Нет требований по разряжению

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

Таблица 1.8

Группа	Требования			Указываемый параметр
	ePM _{1, min}	ePM _{2,5, min}	ePM ₁₀	
ISO Coarse	—	—	< 50 %	Начальная пылезадерживающая способность
ISO ePM ₁₀	—	—	≥ 50 %	ePM ₁₀
ISO ePM _{2,5}	—	≥ 50 %	—	ePM _{2,5}
ISO ePM ₁	≥ 50 %	—	—	ePM ₁

Примечание. Указываемая эффективность = средняя эффективность между начальной 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 мкм в соответствии с классификацией фракций. В старом стандарте классификация фильтров осуществлялась только для частиц размером 0,4 мкм. Основываясь на оценках нового стандарта, пользователи смогут выбрать фильтры, наиболее подходящие их конкретным требованиям.

Ряд западных производителей воздушных фильтров привели свою продукцию в соответствие 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].

Пример классификации фильтров Viledon

Таблица 1.9

Фильтр	EN 779	ISO 16890
T60	M6	ISO ePM ₁₀ 60 %
MX 85	F7	ISO ePM _{2,5} 65 %
MX 98	F9	ISO ePM ₁ 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].

Соотношение фильтров по стандартам EN 779:2012 и ISO 16890

Таблица 1.10

Класс фильтра	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 M6 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 фильтро-элементов F8 с 70 % должна быть переведена 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 ненужного оборудования. Следовательно, мониторинг окружающей среды, в которой эксплуатируются энергетические ГТУ, является ключом 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 вступил 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 *табл. 1.11*.

Процедуры тестирования фильтров

Таблица 1.11

Метод испытания	Диапазон размеров частиц	Аэрозоль тестирования	Кондиционирование	Загрузка пыли в два этапа (первый шаг 50 г)	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	ISO12103–A2	ISO 12103–A2			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 стандарте использованы два метода определения эффективности:

- эффективность частиц (измеренная по количеству и размеру частиц) – E;
- гравиметрическая эффективность (процентное соотношение массы загружаемой пыли) – A.

Для определения влияния электростатического заряда на эффективность очистки из одного из двух фильтров, представленных 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 определяется до и после процедуры кондиционирования.

Процентная эффективность очистки воздуха при заданных размерах частиц с помощью аэрозоля DEHS определяется 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 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 уста-

новки окончательного испытательного падения давления не выше 375 Па (1,5 дюйма в WG).

Гравиметрическая эффективность определяется методом загрузки тестируемого фильтра пылью в два этапа. Мелкодисперсную пыль ISO следует подавать в концентрации 140 мг/м³ (4,0 г/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 ±0,1 г. Высчитывается гравиметрическая эффективность A50 (gravimetric efficiency): взвешенное (массовое) удаление загружаемой пыли объемом, превышающим 50 г. После этого выполняется загрузка второй части тонкой пыли. Оценивается средняя гравиметрическая эффективность Aavg (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 проверке падения давления этот фильтр может быть испытан до 375 Па (1,5 дюйма WG) вместо 625 Па (2,5 дюйма 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

$$E = 1 - N_d/DR \times N_u,$$

где N_d – количество частиц в диапазоне размеров i после фильтра;

DR – коэффициент разбавления;

N_u – количество частиц в диапазоне размеров i перед фильтром.

Гравиметрическую эффективность A₅₀ при загрузке пыли 50 г рассчитывают по формуле:

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

где m_{p50} – масса пыли, прошедшей через фильтр (прирост конечной массы фильтра и пыли в канале между фильтром и последним фильт-

ром) 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 %.

В стандарте ISO 29461-1-2013 «Air intake filter systems for rotary machinery» было запланировано несколько частей:

В *части 2* будут приведены методы испытаний очищающихся (импульсных) фильтров;

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

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

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

Часть 6 будет содержать 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 нем 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 (ИСО 29461-1:2013) и ГОСТ Р 70061-2022 (ИСО 16890) [23].

Сравнение стандартов по методам тестирования воздушных фильтров

Таблица 1.12

Обозначения	ГОСТ Р ЕН 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
Классификация	По классам очистки G, M и F	Нет	По PM ₁ , PM _{2,5} и PM ₁₀
Конечный перепад давления	Классы: G = 250 Па, M и F = 450 Па	HЭ* < 35 % = 375 Па HЭ* > 35 % = 625 Па	ePM ₁₀ < 50 % = 200 Па ePM ₁₀ ≥ 50 % = 300 Па

*HЭ – 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 ЕН 779-2014 эти значения сильно различаются.

Ряд производителей воздушных фильтров класса F (ГОСТ Р ЕН779:2014) уже начали увеличивать этот показатель до 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 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 классификацию 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 непонятна взаимосвязь результатов тестирования фильтров, осуществленного 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 получил официальный статус: ISO 29461-1-2020 «Air intake filter systems for rotary machinery — Test methods — Part 1: Static filter elements» [25]. В нем изложены методы испытаний – обзор общих требований и процедур тестирования, новая классификация фильтров и их соотношение с другими стандартами. В *табл. 1.13* представлена классификация одних и тех же фильтров с действующими европейскими стандартами ISO 29461, ISO 29463 и ISO 16890.

Классификация фильтров

Таблица 1.13

Класс	Группа	ISO 29463	ISO 16890			Нач. гравиметрическая задерживаемость A_{100}
		MPPS efficiency	$ePM_{1, \min}$	$ePM_{2,5, \min}$	$ePM_{10, \min}$	
ISO T1	Грубой очистки					$20 \% < A_{100} < 50 \%$
ISO T2						$\geq 50 \%$
ISO T3						$\geq 70 \%$
ISO T4						$\geq 85 \%$
ISO T5	ePM_{10}				$\geq 50 \%$	
ISO T6	$ePM_{2,5}$			$\geq 50 \%$		
ISO T7	ePM_1		$\geq 50 \%$			
ISO T8			$\geq 70 \%$			
ISO T9			$\geq 85 \%$			
ISO T10	EPA	$\geq 85 \%$				
ISO T11		$\geq 95 \%$				
ISO T12		$\geq 9,95 \%$				
ISO T13	HEPA	$\geq 99,95 \%$				

Фильтры, предназначенные для применения в роторных машинах, следует обозначать литерой Г (турбомашины). Европейский рынок получил понятный нормативный документ, позволяющий ориентироваться в хитросплетениях классификации фильтров различного назначения, выполненных согласно методикам тестирования сразу нескольких европейских стандартов.

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

– *Классы Г1–Г4* тестируются по ISO 16890, пылезадерживающая способность определяется для первых 100 г пыли.

– *Класс Г5* тестируется по ISO 16890.

– *Классы Г6–Г9* тестируются по ISO 16890, в расчет берется только минимальная эффективность

– *Классы Г10–Г13* 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 устойчивость в условиях тумана и туманной среды) [26].

Серия стандартов ISO 29461 предоставляет возможность сравнивать данные продукты аналогичным методом и определять, 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 счете 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. Если оборудование работает в дождливой, туманной, дымовой или другой среде с высокой влажностью или в местной производственной среде, содержащей большое количество водяного пара, например рядом с градирней, воздушные фильтры задерживают водяной туман и капли, когда воздух проходит через блок воздушного фильтра. Если задерживается избыточное количество воды, 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 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 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 соответствующие тесты испытаний по оценке водостойкости фильтр-элементов в лабораторных условиях.

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

- *часть 3* «методы определения механической целостности фильтрующих элементов» (испытания на разрыв фильтра);
- *часть 4* «методы испытаний систем статических фильтров в морских и оффшорных условиях» (тестирование солевыми брызгами).

В 2019 году, основываясь на многолетнем опыте эксплуатации и результатах многочисленных исследований 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 ГОСТов, касающихся воздухоочистки, являются техническим переводом западных (европейских) стандартов, наш призыв не был услышан и приоритет в вопросе определения водостойкости фильтров перешел к европейцам.

*Нет пророка в своем отечестве
(Евангелие от Матфея 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 влияет на эффективность воздушных фильтров [28].

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

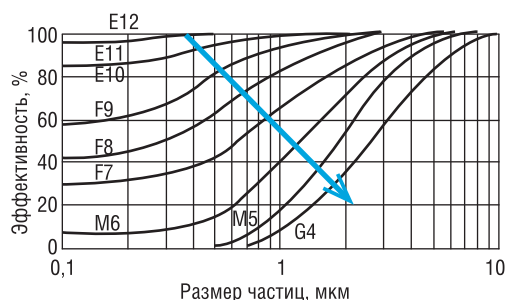


Рис. 1.22. Влияние влажности окружающей среды (голубая стрелка) на класс очистки (эффективность) воздушных фильтров

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 под выбор фильтров для турбокомпрессорного оборудования.

Он заменяет четыре эти 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 четыре 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, таких, как электростанции? Что произойдет с вентиляционным оборудованием, если воздушный фильтр, установленный в вентиляционном канале, разрушится? В лучшем случае нас ждет остановка (поломка) вентилятора или кондиционера. Это в лучшем 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 вентиляционной системе 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. А. В. Клименко [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 выбросов по отраслям приведен в *табл. 2.1*.

*Главные источники антропогенного поступления
парниковых газов в атмосферу [1]*

Таблица 2.1

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 ко-

того 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 (рис. 2.1).

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. 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 водо-

снабжения 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.

Структура потребления энергии в России в 2020 [1]

Таблица 2.2

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 ИРСС (Intergovernmental panel on climate change). Важнейший вывод, который был сделан в докладе: 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 центре 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].

Вызовы, формируемые текущими трендами климатической политики в мире в целом и в нашей стране в частности, диктуют необходимость дальнейшего развития стратегий и мер по снижению выбросов не только 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 данном Положении под предельно допустимыми выбросами понимаются предельно допустимые выбросы, обозначенные 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. появившиеся в результате хозяйственной деятельности человека. Эти две группы оказывают взаимное глобальное влияние.

2.1. Природные источники загрязнений

2.1.1. Вулканы, песчаные и пыльные бури

Значительное влияние на уровень загрязнения окружающей среды оказывают *вулканы*. На Земле насчитывается примерно 1500 активных

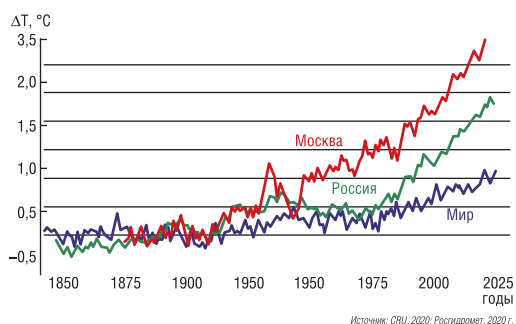


Рис. 2.2. Рост среднегодовой температуры в Москве, на территории России и в среднем в мире



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

вулканов, 50 из них ежегодно извергаются, выбрасывая в воздух пар, пепел, ядовитые газы и лаву [2]. Так, в феврале 2023 года на японском острове Кюсю произошло извержение вулкана Сакурадзима, выбросы поднялись на высоту 1 км. Об этом сообщило Национальное метеорологическое управление Японии. Ранее вулкан Чикурачки на курильском острове Парамушир в Сахалинской области выбросил пепел

на высоту до четырёх километров. Шлейф пепла протянулся примерно на 70 км к востоку от вулкана [3]. На рис. 2.3 изображено извержение вулкана на Камчатке.

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

В нашей стране пустынь очень мало, 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 Благовещенском 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 чего тонны



а)



б)

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

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

2.1.2. Пожары

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

Остановимся на этом фото более подробно, поскольку событие оказало существенное влияние как на жителей Москвы и Московской области, так и на энергетические объекты столицы.

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 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 последствиям 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 его оценке, подобной жары, возможно, не случалось даже 5000 лет.

Причиной аномально высокой температуры воздуха, установившейся на столь длительный срок, явился так называемый «блокирующий» антициклон – обширный, малоподвижный, длительно существующий, который не пропускал другие воздушные массы на занятую им территорию.

Необычно длительный срок существования этого антициклона (более двух месяцев), а также преобладание юго-восточного ветра привели



Рис. 2.5. Пожар на торфяных болотах в Подмоскowie. 2010 год (<https://clck.ru/33RwKr>)

к длительному разогреву воздуха до рекордных температур, особенно в Европейской части России. Метеостанция «Балчуг» в Москве 29 июля зафиксировала максимальную температуру атмосферного воздуха +39 °С.

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 Подмосковье 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): по угарному газу – почти до 7 раз, по взвешенным веществам – до 16 раз, по диоксиду азота – более чем в 2 раза [7–10].

Десятого августа управление ЗАГС Москвы сообщило, что уровень смертности в городе 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 табл. 2.3 приведены результаты замеров, выполненных 10 и 12 августа 2010 г. на Звездном бульваре в Останкинском районе Москвы [11].

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 1/м³). Содержание этих частиц составляло 84,8 и 88,0 % соответственно.

На рис. 2.6 представлена фотография смога в Москве днем 3 августа 2010 г. в районе ТЭЦ ОАО «Мосэнерго» на Бережковской набережной.

Седьмого 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

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

Размер частиц, мкм	Количество частиц, 1/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	5633 916	1526 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

фильтрах КВОУ достигались в течение нескольких часов работы ГТУ (рис. 2.7) [11].

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 перепада 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 значительно снизился 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 по 25 июля в Красноярске сохранялись неблагоприятные метеорологические условия, связанные с задымлением. Для снижения антропогенной нагрузки был введен режим неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) первой степени опасности. При объявлении режима



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

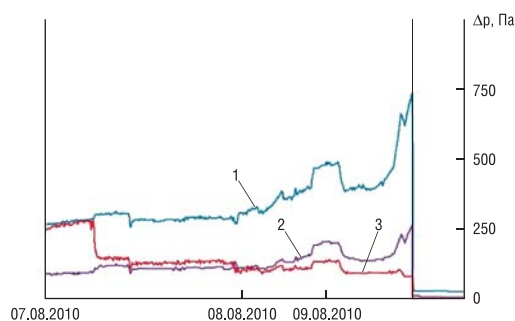
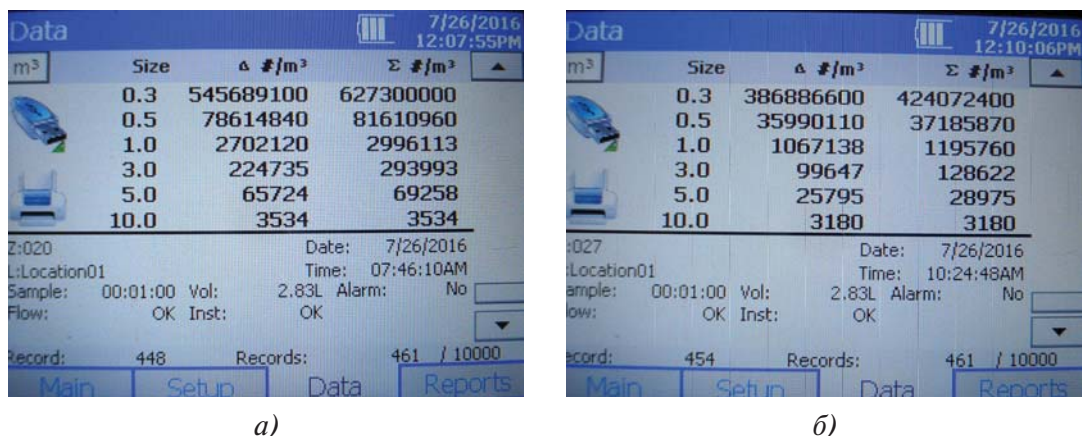


Рис. 2.7. Тренды перепадов давления на фильтрах КВОУ ГТУ 7 августа 2010 г. 1 – фильтры тонкой очистки; 2 – фильтры грубой очистки; 3 – коагуляторы

«черного неба» промышленные предприятия должны снижать выбросы вредных веществ в атмосферу.

По телевизионному сообщению главы Гидрометцентра, 26 июля 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 2010 года в Московской области, этот смог 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 кубометре атмосферного воздуха 26.07.2016 года: а) на всасе КВОУ ТЭЦ в Юго-Западном административном округе (ЮЗАО); б) ТЭЦ в МО

В результате замеров на ТЭЦ в ЮЗАО и в МО 26 июля была зафиксирована повышенная концентрация взвешенных частиц на всасах КВОУ. Расстояние между ТЭЦ в ЮЗАО и ТЭЦ, расположенной в МО, составляет 26 км по прямой. Эта незначительная разница 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/м³ 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 рис. 2.9 [11].

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 табл. 2.3, 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 первых ступенях системы фильтрации КВОУ).

За четыре дня эксплуатации в данных климатических условиях было израсходовано 20 % срока службы этих фильтров. 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 эквиваленты 40 дням эксплуатации в нормальных условиях.

Из-за незначительной скорости ветра над Москвой в конце июля 2016 года смог от красноярских пожаров медленно покидал столицу, уровень загрязнения атмосферного воздуха снижался постепенно. 28 июля 2016 года на московских ТЭЦ в Южном административном округе (ЮАО) и ТЭЦ в Западном административном округе (ЗАО) была зафиксирована концентрация взвешенных частиц вдвое меньшая, чем двумя днями ранее на ТЭЦ в ЮЗАО (рис. 2.10) [11]. В ЮАО находится две ТЭЦ, поэтому дадим им обозначение ЮАО1 и ЮАО2. Расстояние между ТЭЦ в ЮАО1 и ТЭЦ в ЗАО по прямой всего 7 км, поэтому разница в общем количестве взвешенных частиц в атмосферном воздухе ТЭЦ не отличалась более чем на 8,5 %.

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

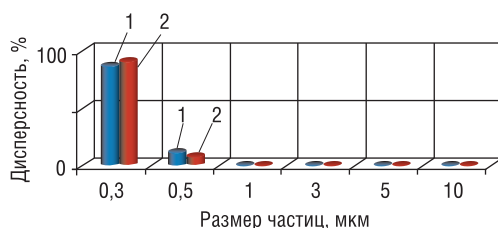


Рис. 2.9. Распределение дисперсности взвешенных частиц атмосферного воздуха на всасе КВОУ ТЭЦ в ЮЗАО (1) и ТЭЦ в МО (2) 26 июля 2016 года

Size	Δ #/m³	Σ #/m³
0.3	283386600	333592900
0.5	46780920	50206360
1.0	2624382	3425442
3.0	591166	801060
5.0	198940	209894
10.0	10954	10954

а)

Size	Δ #/m³	Σ #/m³
0.3	257241300	305145200
0.5	46433220	47903890
1.0	1307420	1470671
3.0	124382	163251
5.0	36749	38869
10.0	2120	2120

б)

Рис. 2.10. Количество взвешенных частиц в кубометре атмосферного воздуха на всасе КВОУ ТЭЦ в ЮАО1 (а), ТЭЦ в ЗАО (б)

Очевидна практически полная идентичность дисперсности взвешенных частиц в атмосфере обеих ТЭЦ. Сравнивая эти данные со аналогичными значениями в табл. 2.3, приходим к выводу, что дисперсность частиц в атмосферном воздухе ТЭЦ в ЮАО1 и ТЭЦ в ЗАО 28 июля

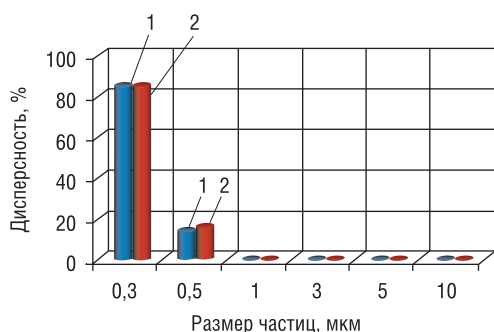


Рис. 2.11. Распределение дисперсности взвешенных частиц атмосферного воздуха на всасе КВОУ ТЭЦ в ЮАО1 (1) и ТЭЦ в ЗАО (2) 28 июля 2016 года

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 действующими ПГУ. На рис. 2.12 приведены графики количества взвешенных частиц в атмосферном воздухе, зафиксированные на всасах КВОУ ГТУ 26–29 июля 2016 года, в сравнении со среднемесячными значениями июня и августа [11].

Превышение концентрации взвешенных частиц в в кубометре атмосферного воздуха (26–29 июля 2016 г. над средними значениями в июне и августе) Таблица 2.4

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

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

На рис. 2.13 приведены графики распределения мелкодисперсных частиц (0,3–0,5 мкм) взвешенных частиц в атмосферном воздухе, зафиксированные на всасах КВОУ ГТУ 26–29 июля 2016 года, в сравнении со среднемесячными значениями июня и августа. В отличие от зависимостей, приведенных на рис. 2.12, в данном случае имеем минимум функции двух переменных в июле. Наибольшее содержание мелкодисперсных частиц зафиксировано на ТЭЦ в МО, наименьшее – на ТЭЦ в ЗАО [11].

Графические зависимости, представленные на рис. 2.12 и 2.13, 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 суще-

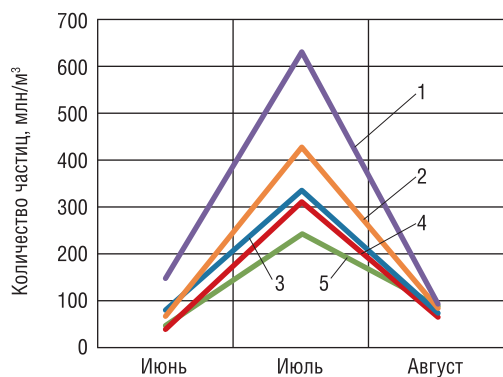


Рис. 2.12. Количество взвешенных частиц на всасах КВОУ ТЭЦ: 1 – ТЭЦ в ЮЗАО; 2 – ТЭЦ в МО; 3 – ТЭЦ в ЮАО1; 4 – ТЭЦ в ЗАО; 5 – ТЭЦ в Северо-Западном административном округе (СЗАО)

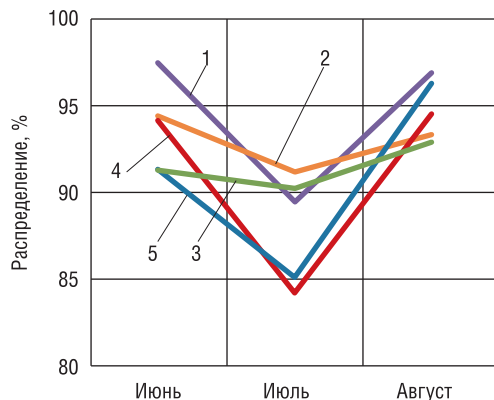


Рис. 2.13. Сравнение ТЭЦ с ГТУ по распределению мелкодисперсных частиц (0,3–0,5 мкм) в кубометре атмосферного воздуха на всасах КВОУ: 1 – ТЭЦ в ЮЗАО; 2 – ТЭЦ в МО; 3 – ТЭЦ в СЗАО; 4 – ТЭЦ в ЗАО; 5 – ТЭЦ в ЮАО1

ственное 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 кубометре атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ.

2.1.3. Слоистость приземного слоя тропосферы

Это 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 подразделяется на тропосферу, стратосферу, мезосферу, термосферу и экзосферу [12].

Тропосфера – это нижний слой атмосферы, где сосредоточено до 80 % всей массы воздуха планеты, 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 удалением от поверхности земли температура воздуха снижается в среднем на 0,6 °С на каждые 100 м. 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 м, проявляется механическое и тепловое воздействие земной поверхности на воздушные потоки, в результате чего возникает сильная турбулентность. Типичная высота размещения 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 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 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 кубометре приземного слоя воздуха.



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

Для определения изменения загрязненности воздуха в зависимости от точки забора пробы 19.11.2015 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].

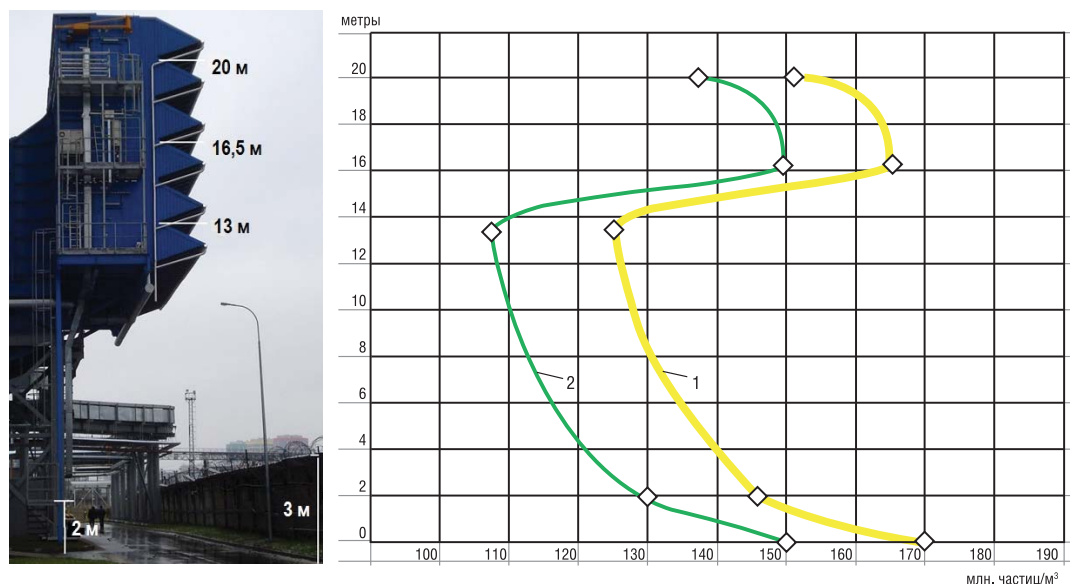


Рис. 2.15. Распределение количества взвешенных частиц в атмосферном воздухе по высоте КВОУ ТЭЦ в ЗАО: 1 – общее количество частиц; 2 – количество частиц размером 0,3–0,5 мкм

Следует отметить, что перед КВОУ установлен забор высотой 3 м, являющийся естественной преградой для потоков воздуха, поступающего извне. Результаты замеров представлены на *рис. 2.15*. Как видим, 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.

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 на всасе нижнего яруса КВОУ ГТУ на высоте 13,0 м, счетчиком частиц AeroTrak 9306-V2 (США) [13]. Показания прибора зафиксировали наименьшее количество и наибольшую концентрацию взвешенных частиц в кубометре воздуха по высоте КВОУ ГТУ.

Size	$\Delta \#/\text{m}^3$	$\Sigma \#/\text{m}^3$
0.3	107930400	125652300
0.5	10569960	17721910
1.0	5904947	7151944
3.0	1132862	1246996
5.0	112014	114134
10.0	2120	2120

Date: 11/19/2015
Time: 08:47:53AM
Vol: 2.83L Alarm: No
Inst: OK

а)

Size	$\Delta \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\Sigma \mu\text{g}/\text{m}^3$
0.3	8	196
0.5	5	188
1.0	40	183
3.0	86	143
5.0	52	57
10.0	5	5

Date: 11/19/2015
Time: 08:47:53AM
Vol: 2.83L Alarm: No
Inst: OK

б)

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

На *рис. 2.17* представлены зависимости общего количества и концентрации взвешенных частиц в кубометре 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. Наибольшая величина зафиксирована на высоте 13,0 м, т. е. на всасе нижнего яруса КВОУ.

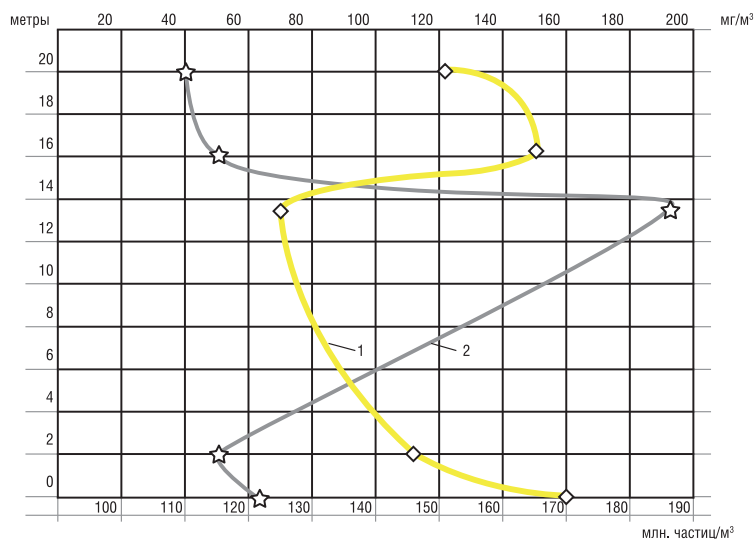


Рис. 2.17. Распределение суммарного количества (1) и концентрации (2) взвешенных частиц в кубометре атмосферного воздуха по высоте КВОУ (19.11.2015)

Таким образом, мы имеем ситуацию, когда наибольшее количество частиц поступало на второй ярус, а максимальная концентрация была отмечена на нижнем ярусе КВОУ. В то же время на отметке 16,5 м концентрация взвешенных частиц соизмерима с величиной на высоте 2,0 м.

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

Результаты расчета пылевой нагрузки на фильтры КВОУ

Таблица 2.5

Ярус КВОУ	С, мг/м³	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 меньше, 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 заменить бло-

кированные пылью фильтры на определенном ярусе. Это позволит значительно сократить время замены и трудозатраты, а также финансовые издержки из-за необоснованного расходования фильтров.

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

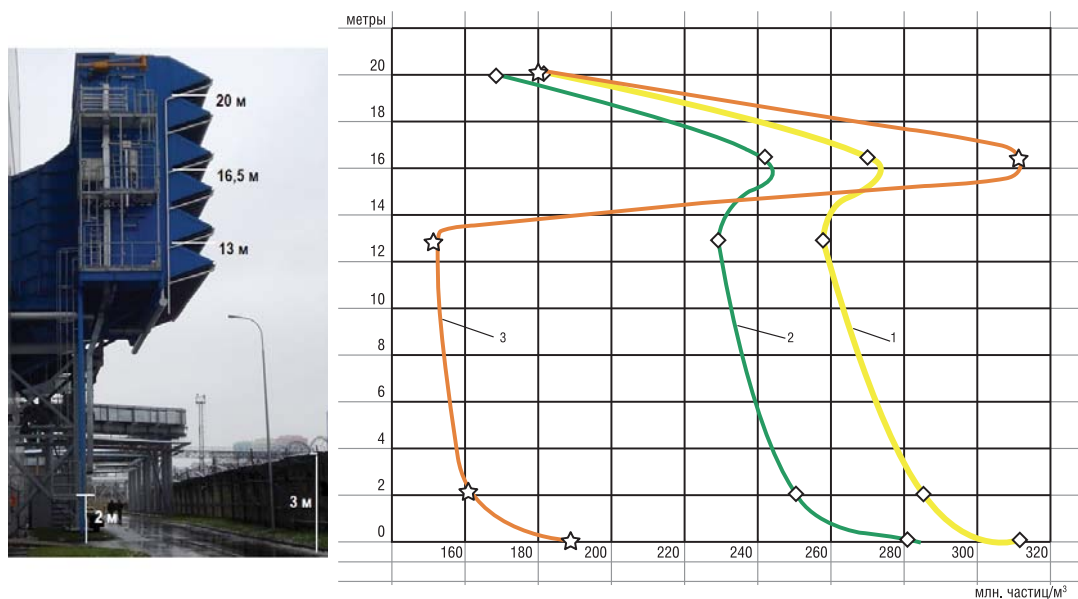


Рис. 2.18. Распределение количества и концентрации взвешенных частиц в кубометре атмосферного воздуха по высоте КВОУ (29.03.2016): 1 – суммарное количество взвешенных частиц; 2 – количество мелкодисперсных частиц (0,3 мкм); 3 – суммарная концентрация взвешенных частиц

Несмотря на то что в данном случае количество взвешенных частиц в кубометре воздуха в 1,2–2,0 раза превышает запыленность воздуха на всасах КВОУ в осенний период времени, наибольшее значение также 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 *рис. 2.19* представлено процентное распреде-

ление количества и концентрации взвешенных частиц в кубометре воздуха 19.11.2015 и 29.03.2016.

Из представленной гистограммы (рис. 2.19а) видно, что количество мелкодисперсных частиц 0,3 мкм в 2016 году на 4 % больше, чем в 2015 году. При этом в 2015 году частиц размером 1,0 мкм на 4 % больше, чем в 2016 году. Очевидно, 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 также была высокой и превышала 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 кубометре воздуха составляло 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 наблюдалось расслоение потоков воздуха с большим количеством и высокой концентрацией взвешенных частиц по высоте КВОУ. Это расслоение обусловлено высокой концентрацией крупных (тяжелых) взвешенных частиц, неспособных подняться выше 13,0 м (нижний ярус КВОУ). 29.03.2016 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 была зафиксирована 8 сентября 2016 года при мониторинге загрязненности воздуха на всесе КВОУ ГТУ ТЭЦ, расположенной на границе ЮАО2 и МО [13]. На

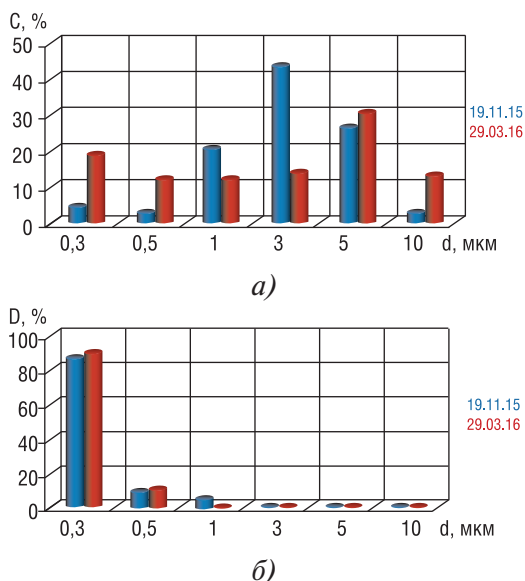


Рис. 2.19. Распределение концентрации C (а) и дисперсности D (б) взвешенных частиц в атмосферном воздухе на ТЭЦ в ЗАО в воздушном слое наибольшей концентрации

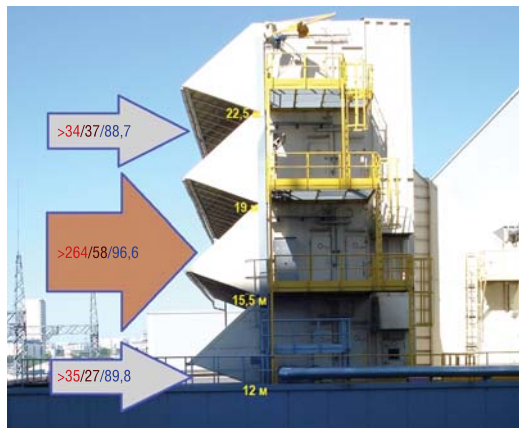


Рис. 2.20. Распределение слоев воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ ЮАО2: первое число – суммарное количество взвешенных частиц; второе – суммарная концентрация взвешенных частиц; третье – процентное содержание мелкодисперсных частиц 0,3 мкм в кубометре воздуха

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.

Как видно из представленных данных, на всас второго и третьего ярусов КВОУ поступает слой воздуха с наибольшим количеством ($\text{млн}/\text{м}^3$) 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 также выше, чем в прилегающих к нему снизу и сверху слоях воздуха. Общее количество взвешенных частиц, поступающих

на второй и третий ярус КВОУ, более чем в 7,5 раза 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.

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, именно эти ча-

стицы будут оказывать основное, преобладающее влияние на работу фильтров КВОУ.

На первых ступенях КВОУ обычно устанавливаются коагуляторы и фильтры грубой очистки класса 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. Соизмеримыми с концентрацией мелкодисперсных частиц в наиболее запыленном слое воздуха оказались частицы размером 5 мкм (рис. 2.21б). Но, как и 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 уровня загрязненности воздушных слоев атмосферного воздуха;
3. Датчики перепадов давления, установленные в КВОУ, не отражают истинной картины загрязнения фильтров по высоте воздухозаборного тракта;

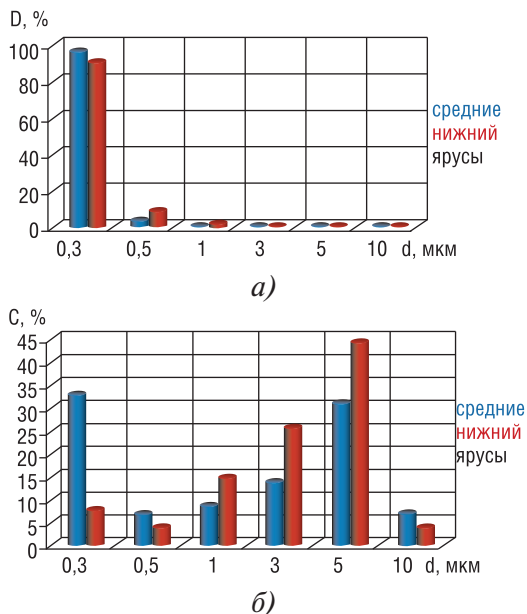


Рис. 2.21. Дисперсность D (а) и распределение концентрации C (б) взвешенных частиц в атмосферном воздухе на нижнем и средних ярусах КВОУ ГТУ

4. Для 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

Согласно [14], ледяной дождь – это твердые атмосферные осадки (охлажденные осадки), выпадающие при отрицательной температуре воздуха (чаще всего $0...-10^{\circ}$, иногда до 15°) в виде твердых 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 для работающего оборудования. Кривая статистики травматизма из-за многочисленных падений людей резко идет вверх, а очереди в травмпункты становятся длиннее. 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).

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.

В результате воздействия этого природного явления на систему фильтрации циклового воздуха энергетической ГТУ фильтровальный материал фильтр-элемента сначала намокает под воздействием атмосферной влаги,



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

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. Возникает вынужденный перерасход топлива, используемый на покрытие недополученной мощности турбомшины. Кроме того, появляется опасность разрушения самого фильтра.



Рис. 2.23. Обледенение панельного 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 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, лопатки компрессоров покрываются биомассой насекомых, попавших в проточную часть турбомшины.

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

Актуальность этой проблемы становится еще более очевидной, если вспомнить, что тайга, смешанные леса, лесотундра и тундра, где обитают в изобилии эти насекомые, составляют 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.



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

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 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, 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, которые распространяют вирусы желтой лихорадки и денге. Среди родов *Culex* и *Aedes* известны переносчики различных вирусных энцефаломиелитов, хозяева 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 является комар-звонец (рис. 2.25б).

Название комар получил по характерному звуку, 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 калазар (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 выпивают 70 комаров или 4000 мокрецов.



а)



б)

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

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 листьях, ветвях, в щелях под камнями или упавшими деревьями. В лесу и сельской местности можно встретить настоящие полчища двукрылых после одновременного вылета миллионов взрослых



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

особей из ближайших водоемов (рис. 2.26).

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 кишачих 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 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» (рис. 2.27а).

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 (долго-

ножки). На *рис. 2.28* показан размер комара на фоне мерной линейки.

По данным словаря Брокгауза и Ефрона [17], длина комара обыкновенного – *Culex Iriens L. (vulgaris L.)* 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* длиной 2,5–3 мм, черно-бурый, 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 П. П. Перфильева, полученным еще в 60-х гг. прошлого столетия, длина москитов 1,2–3,7 мм [18]. Длина мух настоящих 2–15 мм. Самый мелкий вид муха-горбатка длиной 0,4 мм, самые крупные до 6 см.

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

В *табл. 2.6* приведены осредненные данные размеров двукрылых насекомых, полученные из разных источников. Они представляют практический интерес для разработки устройств, защищающих от насекомых персонал станций и дви-



а)



б)

Рис. 2.27. Нашествие комаров-звонцов в Таганроге: а) в 2018; б) в 2021 году (<https://privet-rostov.ru/>)

© ALAN HENDERSON



Рис. 2.28. Комар (Alan Henderson© <https://news.mn/r/2254942/>)

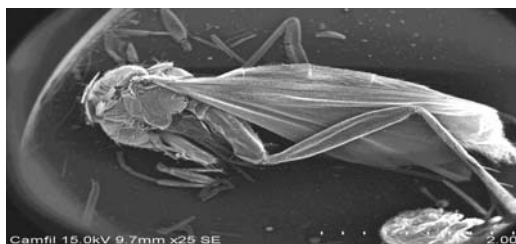


Рис. 2.29. Скелет двукрылого насекомого

гатели. 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 ведется отлов и учет насекомых.

Плоды цветения растений

Другим важным сезонным фактором, влияющим на качество жизни населения и работу технических средств, является цветение растений. Помимо аллергии и астмы, затруд-

нения дыхания у части людей, цветение ряда растений вызывает большие проблемы при эксплуатации энергетического оборудования.

Одним из таких растений является *тополь*. Точные сроки его цветения зависят от климатической зоны. Примерно это апрель–май, до появления или одновременно с появлением первых листочков, а вот так раздражающий нас через два месяца в июне–июле тополиный пух — это созревшие плоды тополя с семенами, покрывающие все вокруг «ковром ваты» (рис. 2.30а).

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, чем другие деревья, площадь, благодаря компактности кроны, относительно дешев. Предложение было рассмотрено, программа озеленения утверждена, в Москву пришли тополя и начали свое победное шествие по всей стране. Тополь — растение двудомное, то есть у него есть деревья

Осредненные размеры двукрылых насекомых, мм [19] *Таблица 2.6*

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



а)



б)

Рис. 2.30. Тополиный пух: а) везде; б) цветение (<https://golos.id/ru>)

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, что прекрасно показал пример с тополями.

Известно, что растения, некоторые животные и насекомые в определенных ситуациях, приспособиваясь 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 пух, тополь был бы самым лучшим деревом для озеленения городов. За лето каждый тополь улавливает около 35 кг 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 Астровых, или Сложноцветных. 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 (7–12 мм) тонким носиком, на котором располагается хохолок из белых мягких волосков [21]. При плодоношении верхушка стрелки одуванчика представляет собой идеальный шар, образованный сомкнутыми хохолками плодов (рис. 2.31а). С их помощью плод



а)



б)

Рис. 2.31. Одуванчики: а) плодношение; б) обширное поле
(<https://photo-faces.com/31341715/>)

одуванчика может перелетать в воздушных потоках на большие расстояния, засевая значительные площади (рис. 2.31б).

Цветение одуванчиков начинается в последнюю неделю апреля и продолжается весь май. Затем их небольшое цветение можно наблюдать и в течение всего лета. Бурное цветение одуванчиков, покрывающих 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

Размеры пыльцы отдельных видов растений, мкм

(<https://clck.ru/33XDzjf>)

Таблица 2.7

Береза	19–20
Амброзия	18–19
Крапива	13–15
Крупинки пыльцы	10–100

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.

Двукрылые насекомые 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.

Рост перепада давления в системе очистки атмосферного воздуха влечет за собой с технической точки зрения уменьшение срока жизненного



а)



б)

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

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 актуальная задача обеспечения надежной работы газотурбинной техники и спасения человеческих жизней стоит в авиации. Одной из причин, угрожающих безопасности полетов и приводящих к повреждению авиационных двигателей, являются **пернатые**. На рис. 2.33 показано опасное сближение чайки с летящим самолетом.

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

На рис. 2.34 показаны последствия попадания птицы в проточную часть авиационного двигателя.



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

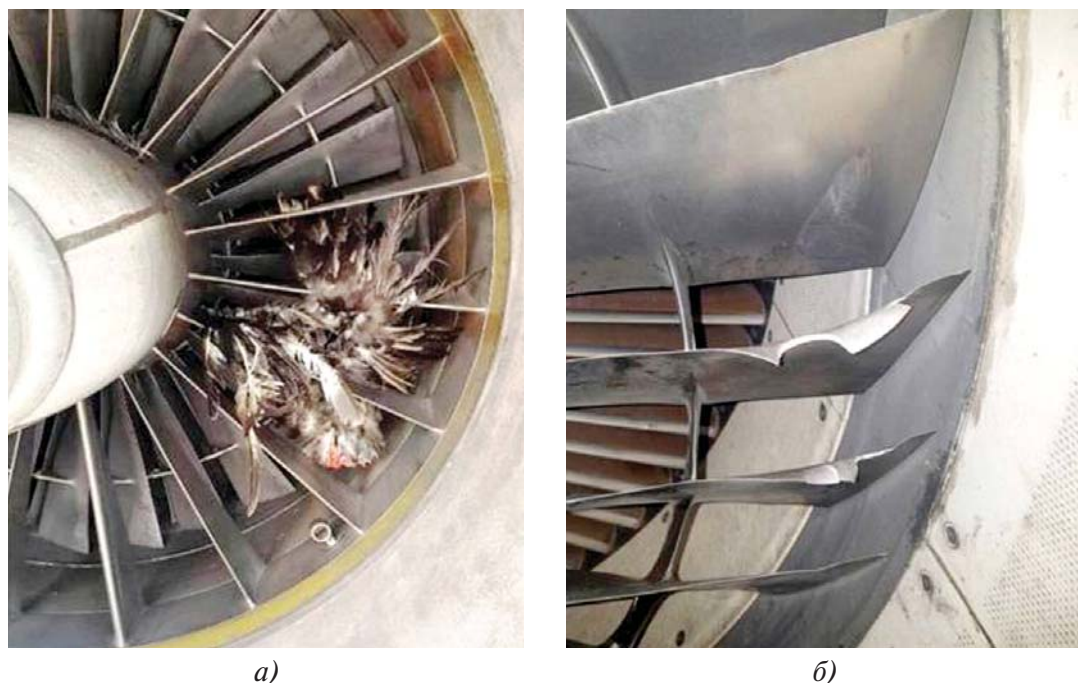


Рис. 2.34. Последствия попадания птицы в авиадвигатель:
а) птица в авиадвигателе; б) повреждение лопаток (<https://clck.ru/33Trog>)

В худшем случае в двигателе может возникнуть помпаж, двигатель выйдет из строя, что приведет к трагическим последствиям.

Попадание птиц в воздухозаборный тракт энергетической ГТУ не повлечет 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 (противообледенительную систему) КВОУ ГТУ снижается конвективный теплообмен между теплоносителем и обогреваемыми элементами (рис. 2.35). В результате этого в зимний период может возникнуть обледенение и занос снегом фильтров элементов, установленных в КВОУ ГТУ (рис. 2.36).

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. Разно-



Рис. 2.35. Теплообменный аппарат КВОУ ГТУ с мусором



Рис. 2.36. Занос снегом фильтров КВОУ ГТУ

образии природных источников загрязнений диктует необходимость создания соответствующих специализированных систем очистки воздуха. К сожалению, помимо природных факторов, на жизнедеятельность людей и эксплуатацию оборудования негативное влияние оказывают и 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 при проектировании как жилых, так и промышленных объектов, а также в повседневной деятельности. В основе этих ошибок лежат либо незнание, либо неучет климатических условий, а также невыполнение требований руководящих документов. Рассмотрим некоторые из них.

2.2.1. Ошибки проектных решений по размещению оборудования



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

В 2005–2006 годах велось проектирование ГТУ-ТЭЦ для ТЭЦ в ЮАО1 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 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.

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 навигационной системы ГЛОНАСС и сверено с генеральным планом ТЭЦ. Голубая стрелка на *рис. 2.38* указывает центральный всас КВОУ [22].

Как видно из *рис. 2.38*, преобладающим направлением ветра, согласно «розе 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, негативное воздействие загрязняющих веществ, приносимых вторым по повторяемости ветром восточного направления, будет незначительным. Однако результаты мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на всасах КВОУ ГТУ говорят об обратном.

На *рис. 2.39* приведены графики процентного распределения количества и концентрации взвешенных частиц в кубометре атмосферного воздуха по всасам КВОУ, построенные по результатам замеров, выполненных в течение четырех времен года 2015–2017 гг. На всех графиках виден ярко выраженный экстремум концентрации частиц ($\text{мг}/\text{м}^3$) 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 по всасам КВОУ не так однозначно. Только при высокой концентрации частиц (97 %) наблюдалось совпадение направления экстремумов обеих величин (*рис. 2.39в, д*). В остальных случаях зафиксировано примерно одинаковое процентное распределение количества частиц, поступающих на всасы КВОУ [22].

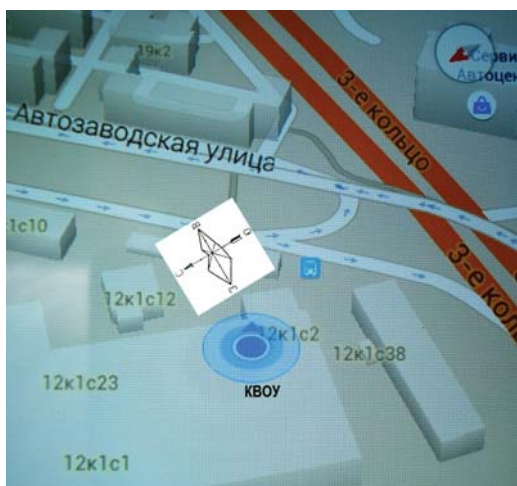


Рис. 2.38. Рекогносцировка положения КВОУ относительно «розы ветров» на ТЭЦ

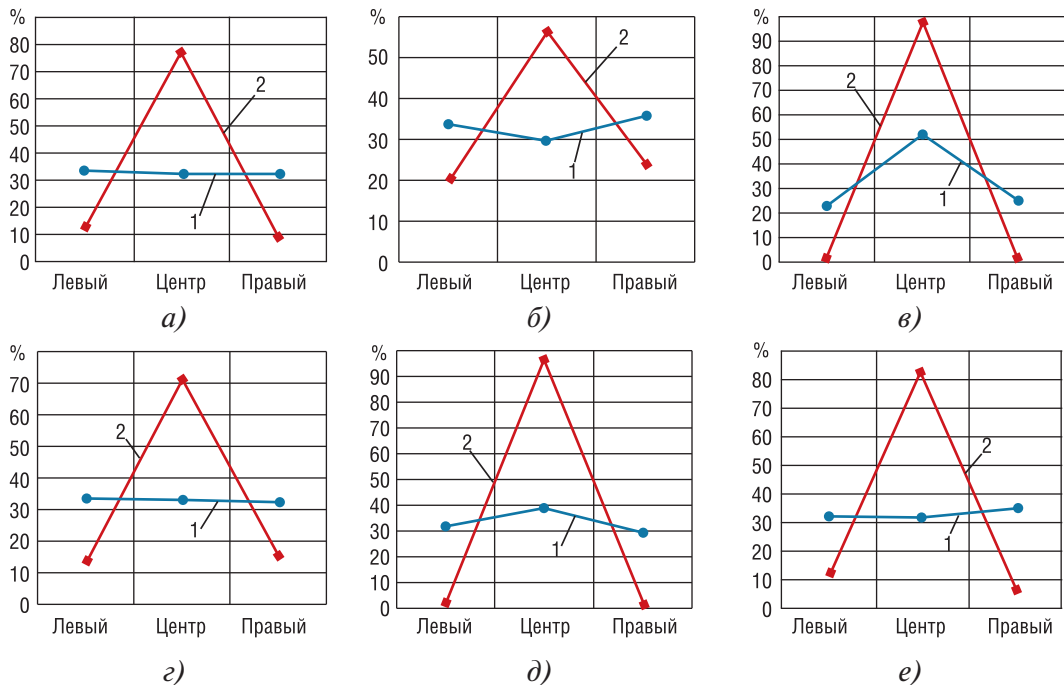


Рис. 2.39. Процентное распределение количества (1) и концентрации (2) взвешенных частиц в кубометре атмосферного воздуха по всасам КВОУ: а) 02.11.2015; б) 04.05.2016; в) 13.05.2016; г) 03.06.2016; д) 09.01.2017; е) 11.05.2017

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

Результаты мониторинга атмосферного воздуха на центральном всасе КВОУ

Таблица 2.8

Дата замера	Кол-во частиц, 1/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 гг. Из табл. 2.8 видно, что с ростом температуры атмосферного воздуха количество частиц в кубометре 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 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 выше, чем в другие времена года.

Особое внимание при анализе мониторинга обращают на себя высокие значения концентрации взвешенных частиц на центральном всасе КВОУ. Концентрация 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 нецелесообразно в связи с расположением рядом с Третьим транспортным кольцом.

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

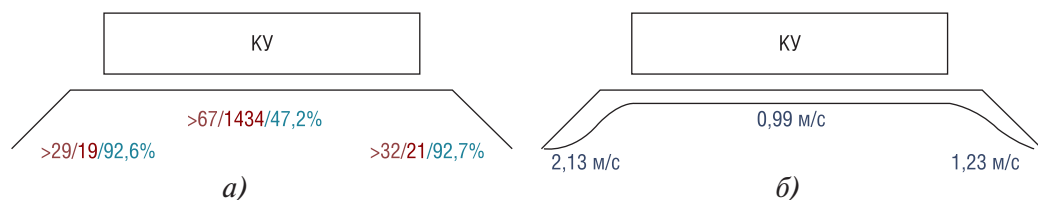


Рис. 2.40. Результаты мониторинга потока атмосферного воздуха на всасах КВОУ (13.05.2016): а) количество, концентрация и процентное содержание мелкодисперсных частиц 0,3 мкм; б) скорость потока атмосферного воздуха на всасах КВОУ

Общее количество частиц в центре КВОУ в 2 раза, а общая концентрация в 68,3–75,5 раз больше, чем на других всасах. При этом процентное содержание мелкодисперсных частиц на центральном всасе КВОУ очень низкое (всего 47,2%), что примерно в 2 раза меньше величин замеров в других местах. В то же время скорость потока воздуха на центральном всасе КВОУ из-за его размещения перед КУ ниже, чем на других всасах (рис. 2.40б).

Логично было бы иметь большее количество и концентрацию взвешенных в кубометре атмосферного воздуха частиц при высокой скорости воздушного потока превалирующего 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 зависимости от их дисперсности перед всасами КВОУ. На *рис. 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].

Как отмечалось ранее, количество мелкодисперсных частиц размером 0,3 мкм мало по сравнению с процентным содержанием этого показателя на других всасах КВОУ (*рис. 2.41а*). При этом концентрация частиц этого размера тоже незначительна, 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 несущественным из-за их малого ко-

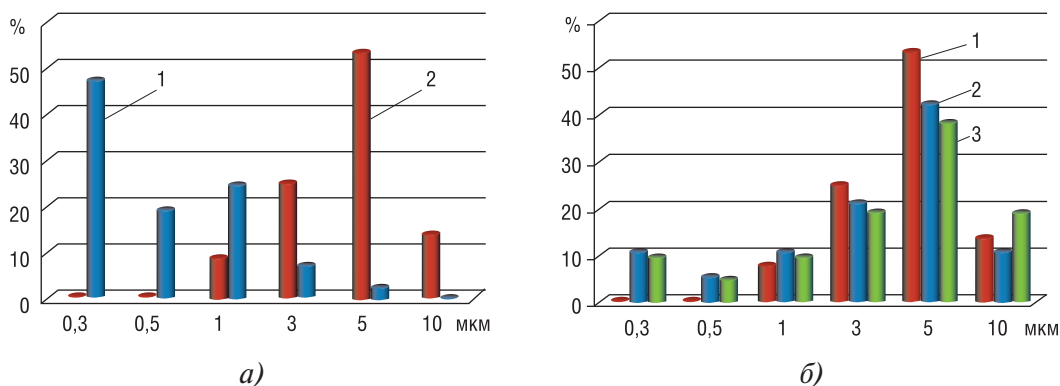


Рис. 2.41. Гистограммы процентного распределения количества и концентрации частиц на всасах КВОУ по результатам замеров (13.05.2016): а) процентное распределение количества (1) и концентрации (2) частиц на центральном всасе КВОУ; б) процентная концентрация частиц в зависимости от их дисперсности. 1 –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

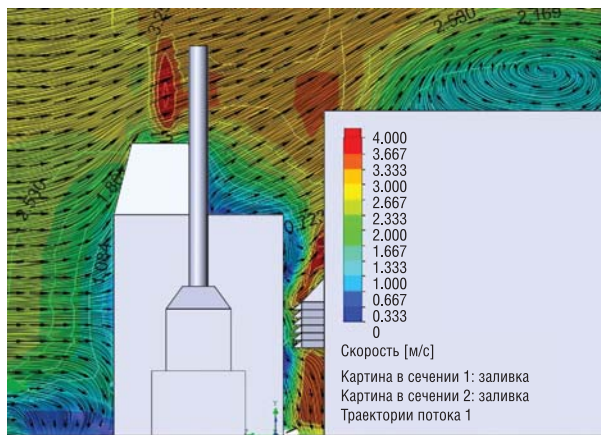
личества (2,4 %). Значимыми для эксплуатации воздушных фильтров центрального всаса КВОУ являются частицы размером 1–3 мкм.

На *рис. 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 превалирующем 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.

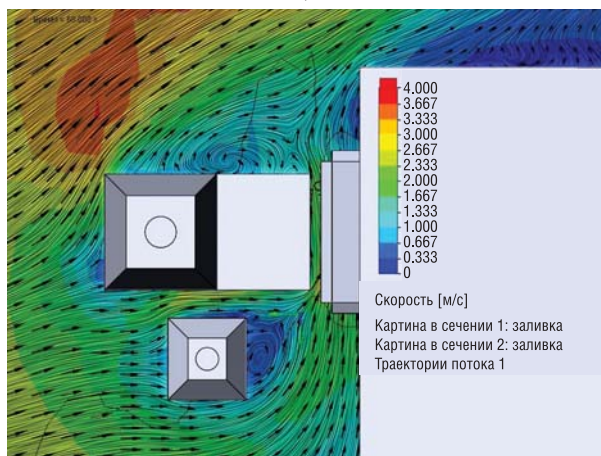
Чтобы понять, почему на центральном всасе КВОУ происходит такое распределение вышерассмотренных параметров, был выполнен аэродинамический расчет натекания воздушного потока на КВОУ с помощью программы математического моделирования Solid Works Flow Simulation. Этот программный комплекс предназначен для моделирования трехмерных течений жидкости и газа на технических и природных объектах, а также для визуализации течений методами компьютерной графики. Программа Solid Works Flow Simulation основана на конечно-объемном методе решения уравнений гидро- и газодинамики и использует 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), закон неразрывности (сплошности) и уравнение SST-модели турбулентности.

На *рис. 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 (*рис. 2.42а*). Зоны разрежения также образуются на подветренной стороне помещения котла-утилизатора и рядом стоящих зданий (*рис. 2.42а, б*). В результате обтекания зданий воздушным потоком восточного направления происходит трансформация поля скоростей на всасах КВОУ [22].

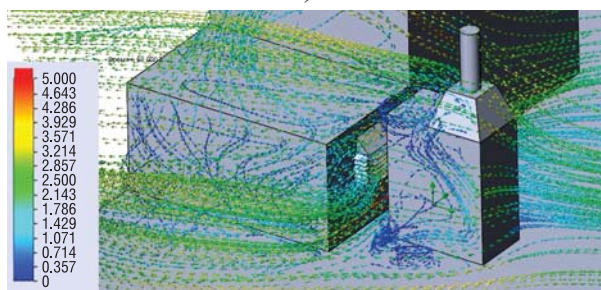
Как видно из эпюр и векторов скоростей, воздушный поток устремляется в зазор между зданием КУ и КВОУ со стороны территории ТЭЦ (*рис. 2.42б*). Следовательно, скорость потока на этом левом всасе КВОУ выше, чем на остальных.



а)



б)



в)

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. 2.40б со значениями скоростей на рис. 2.42а и 2.42б, приходим к выводу, что расчетная аэродинамическая модель течения воздушного потока воздуха на ТЭЦ описывает природу явления не только правильно, но и точно.

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 (рис. 2.42а). 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 этот зазор затягивается большое количество снега, образуя высокую концентрацию взвешенных частиц в атмосферном воздухе. Процентное распределение концентрации взвешенных частиц на центральном всасе КВОУ достигало 97 % по сравнению другими всасами.

Аналогичная величина концентрации была зафиксирована и 13 мая 2016 года. Результаты мониторинга загрязнения атмосферного воздуха на всах КВОУ показывают устойчивую тенденцию образования высокой концентрации взвешенных в атмосферном воздухе частиц в зазоре между зданием машинного зала и помещением КУ.

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

Здание машинного зала по высоте ниже 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 засасываются 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 (рис. 2.41 и 2.42a).

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 барботер, который в процессе работы выбрасывает клубы пара (рис. 2.44).

Совокупность неудачного проектного решения по рас-

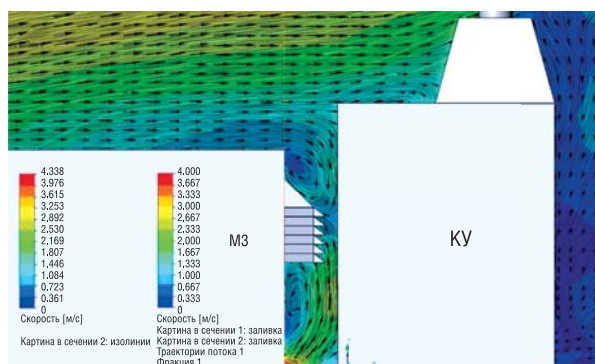


Рис. 2.43. Поле скоростей воздушного потока при западном направлении ветра



Рис. 2.44. Пар из барботера перед всасом КВОУ ГТУ

положению воздухозаборного тракта перед стеной котла-утилизатора, территориальное расположение рядом с Третьим транспортным кольцом Москвы, а также недочеты размещения технического оборудования (эксгаустера и трубы барботера) легли тяжелым бременем на работу системы очистки циклового воздуха энергетической ГТУ.



а)



б)

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

В заключение 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 явилась ГРЭС в Пермском крае на берегу реки Яйва [24]. В зимний период 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 всас КВОУ, в результате чего его защитная сетка от птиц замерзает (рис. 2.45б).

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 рас-

ширительных 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 поступление пара с повышенной температурой на всас КВОУ вызывало снижение расчетной нагрузки ГТУ SGT5-4000F на 5–8 МВт (рис. 2.46). В результате ТЭЦ была вынуждена 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

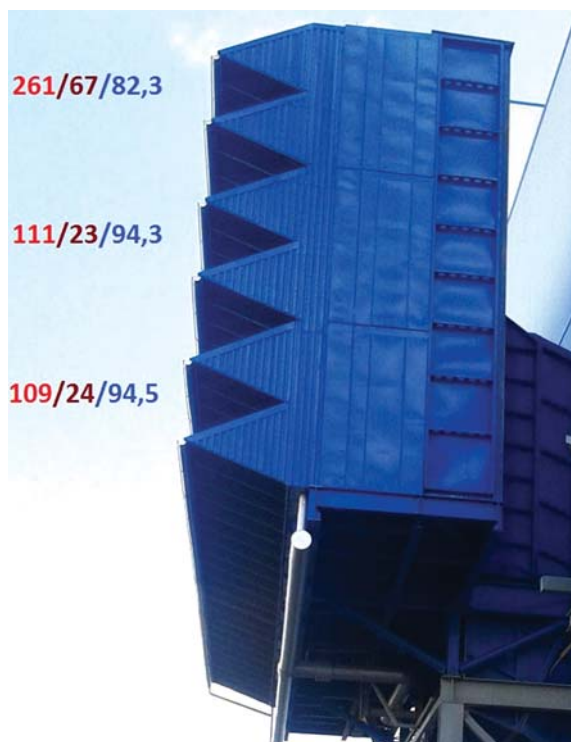
Другой пример неоптимального проектного решения по размещению всаса ВЗТ энергетической ГТУ приведен на рис. 2.47а. Железнодорожный вокзал с многочисленными путями и постоянным движением поездов является рукотворным источником дополнительного загрязнения циклового воздуха, поступающего на всас ГТУ.

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 находилась 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 на всасе КВОУ по ярусам (по высоте). Синим цветом отмечены значения отношения количества мелкодисперсных частиц, %, размером от 0,3 до 0,5 мкм к общему значению. Как видно из представленных данных,



а)



б)

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

общее количество, концентрация и процентное отношение мелкодисперсных частиц на первом и втором ярусе КВОУ мало отличались друг от друга. В течение нескольких следующих минут мониторинга произошел скачок всех измеряемых параметров: количество частиц в кубометре воздуха на всасе третьего яруса КВОУ увеличилось в 2,4 раза, а концентрация в 2,8 раза. Количество мелкодисперсных частиц, наоборот, уменьшилось на 12 %. Иными словами, резко увеличилось количество крупнодисперсных частиц.

Что же произошло? Как отмечалось ранее, всас КВОУ ориентирован на железнодорожный вокзал. Расстояние от КВОУ до границы железнодорожного вокзала составляет несколько метров. В момент взятия пробы воздуха на третьем ярусе КВОУ к границе ТЭЦ подошел пассажирский состав и остановился: над вагонами стоял густой дым работающих печек. В результате 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. Неоптимальные проектные решения ВЗТ для энергетических ГТУ

В соответствии с документом «Общие технические требования 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, противообледенительной системой, охлаждающей 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 (рис. 2.34, 2.35). Типичные металлические защитные сетки от птиц и мусора на КВОУ ГТУ имеют ячейки порядка 30×30 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 является домовая 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.



а)



б)

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

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 крупная птица. Аналогичная ситуация, но уже с противомоскитной сеткой, показана на рис. 2.48б. В зазор, обозначенный красной стрелкой, пролетят не только все двукрылые насекомые, перечисленные в табл. 2.6, но и 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 Рейнланд–Пфальц (ФРГ) и на ТЭЦ в Тюмени на юге Западной Сибири РФ.

Если поставку КВОУ без погодных козырьков в Кайзерслаутерн можно объяснить достаточно мягкими климатическими условиями на юго-западе земли Рейнланд–Пфальц, то применение КВОУ аналогичной конструкции в Западной Сибири с ее низкими температурами и обильными снегопадами объяснению не подлежит. **Налицо грубая ошибка проектантов и изготовителей КВОУ, вызванная неучетом климатических условий Тюменской области.**

В результате этой ошибки в систему очистки циклового воздуха КВОУ ГТУ поступают атмосферные осадки в виде дождя и снега, образуются со-сульки, что не соответствует документу «Общие технические требования

к системам фильтрации для энергетических газотурбинных установок» ОАО РАО «ЕЭС России» (рис. 2.50).

Обмерзание защитных сеток от птиц вызвано снежным заносом воздушных фильтров КВОУ энергетических ГТУ, что обусловлено не только близким расположением башенных и вентиляторных градирен, но и **неудовлетворительной работой противообледенительной системы.**

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

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

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



а)



б)

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



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

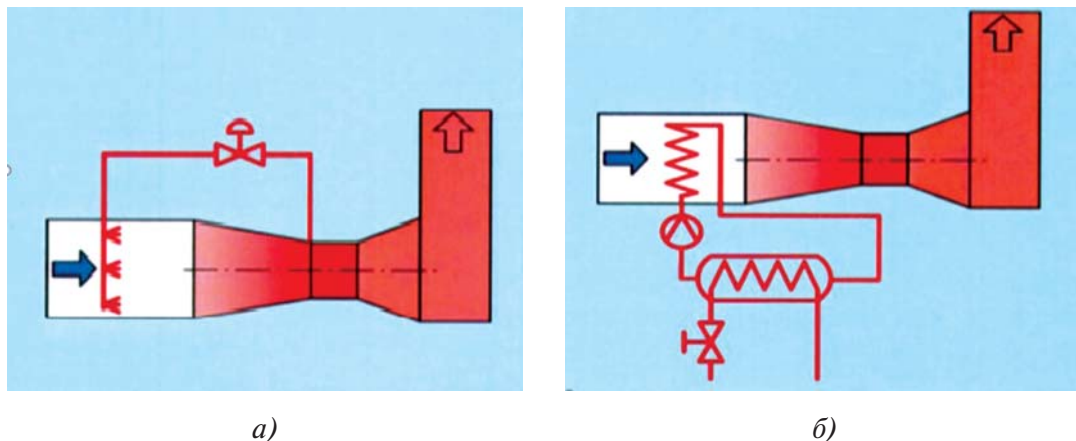


Рис. 2.51. Принципиальные схемы АОС:
 а) подача горячего воздуха из последних ступеней компрессора ГТУ;
 б) нагрев атмосферного воздуха в теплообменном аппарате



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

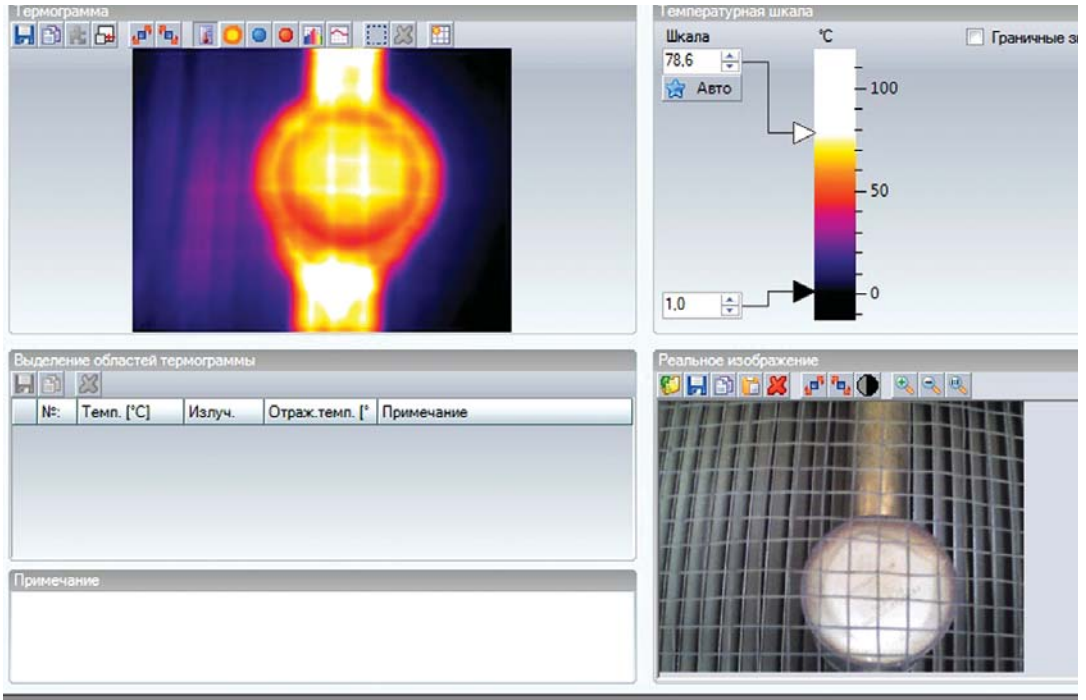
хода воздуха и скоростей) в системе очистки циклового воздуха ГТУ важно знать **распределение скоростей воздуха на всасе КВОУ по его высоте**. С этой целью были выполнены замеры скорости воздуха по высоте КВОУ разной конструкции воздухозаборных трактов.

Кроме того, сделан аэродинамический расчет течения воздушного потока в одном из таких КВОУ и горизонтальном воздуховоде с помощью программы математического моделирования Solid Works Flow Simulation. Результаты замеров скорости воздушного потока на всасе действующей ВЗТ энергетических ГТУ и аэродинамического расчета показали свою идентичность и точность (рис. 2.55).

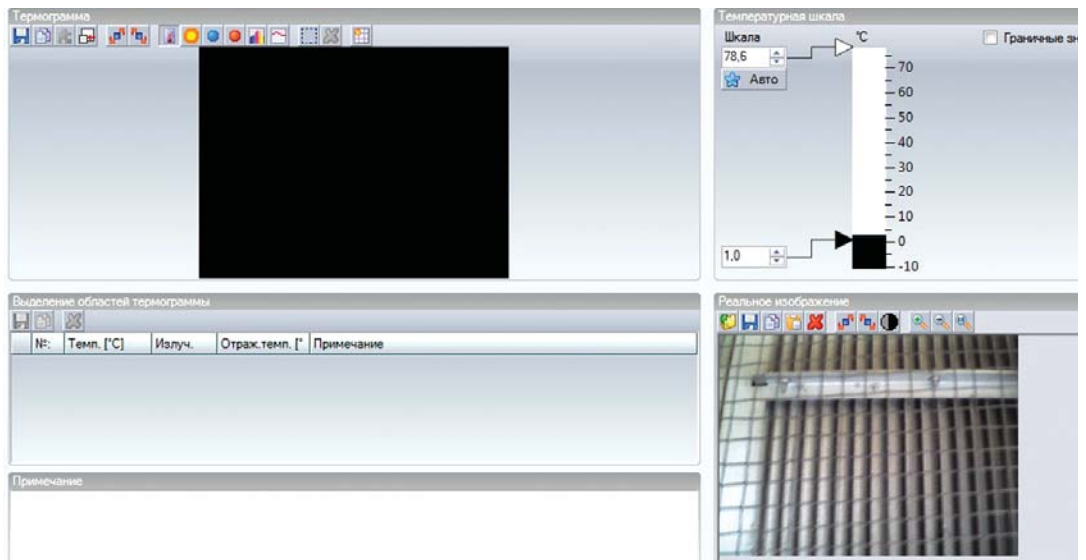
пыла. На этом расстоянии обогрева воздушных фильтров не зафиксировано.

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.

Для оптимальной работы фильтров (на расчетных значениях расхода воздуха и скоростей)



а)



б)

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



а)



б)

Рис. 2.54. Результат работы АОС с распылом горячего воздуха в шахматном порядке:

а) воздушные фильтры мокрые;

б) воздушные фильтры занесены снегом

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 скорость потока на нижнем ярусе в 4,8 раза превышает этот параметр на верхнем ярусе КВОУ ГТУ. Неоптимальные скорости воздушного потока приводят к росту перепада давления на фильтрах, неэффективной очистке 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 замеров и аэродинамических расчетов, проанализируем схемы течения воздушного потока в существующих КВОУ энергетических ГТУ с точки зрения оптимальной работы 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.

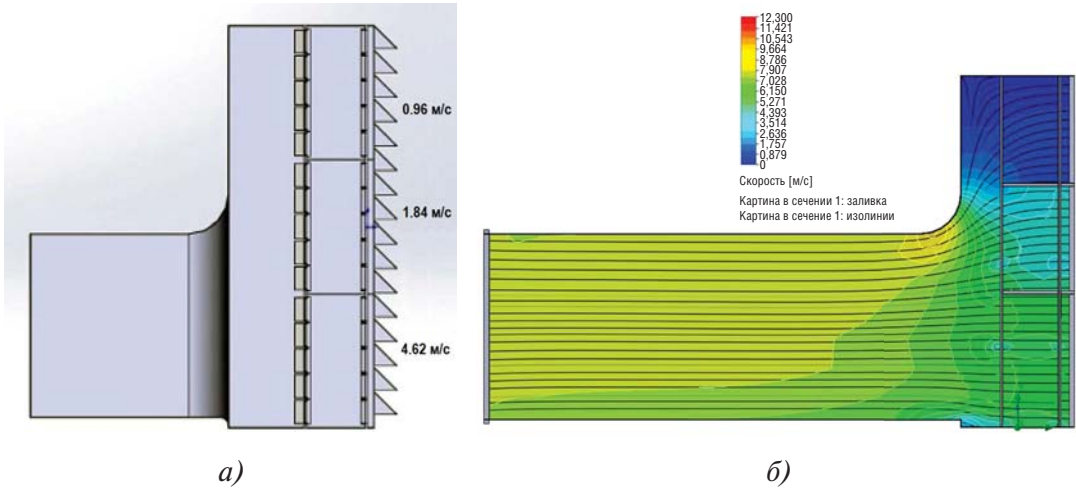


Рис. 2.55. Скорость потока воздуха на всасе КВОУ: а) замеры; б) расчет

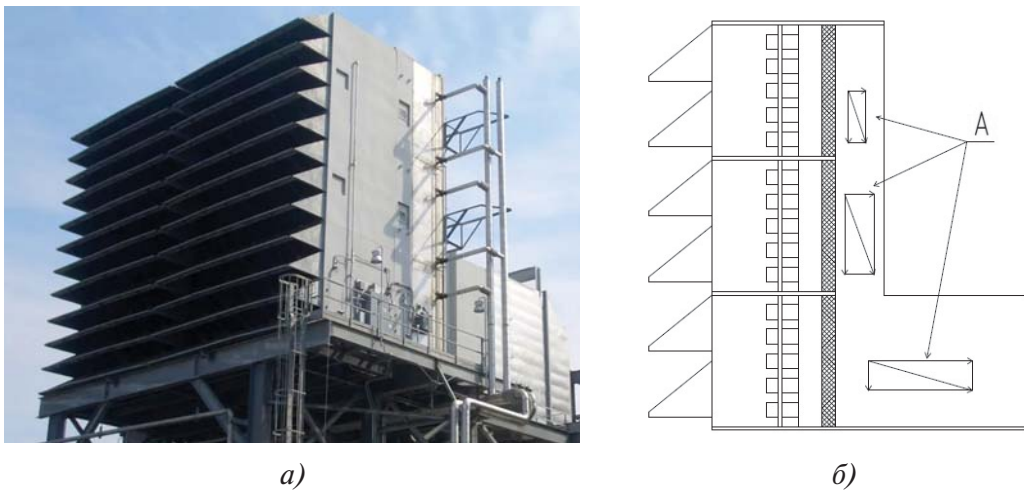


Рис. 2.56. КВОУ А: а) горизонтальный воздуховод на уровне нижнего яруса КВОУ (<https://clck.ru/33Ytqi>); б) схема КВОУ А с треугольниками скоростей после фильтров

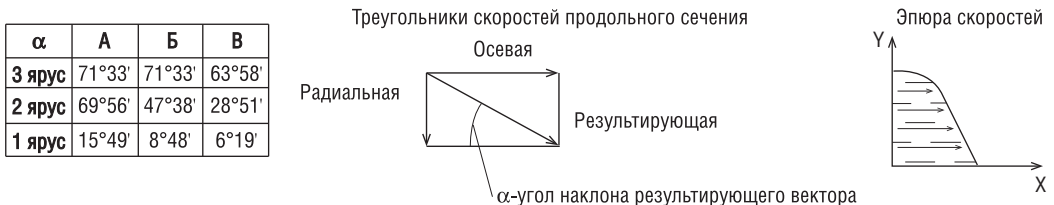
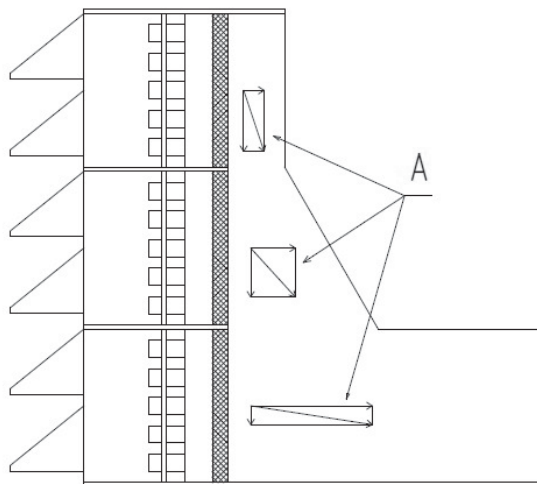


Рис. 2.57. Обозначения векторов скоростей и углов поворота потока, эпюра скоростей по высоте КВОУ ГТУ



а)



б)

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

Из представленных данных видно, что скорости потока за фильтрами КВОУ А и Б на верхних ярусах имеют наименьшую осевую составляющую по сравнению с другими ярусами, а угол поворота потока (вектор результирующей скорости) в воздуховоде наибольший, более 71° . Согласно законам аэродинамики такие большие углы поворота потока инициируют вихревые потоки и повышенные потери давления в воздуховоде.

Радиальные составляющие скоростей в вертикальном канале больше осевых. Это объясняется эжекторным эффектом, когда происходит передача кинетической энергии от воздушного потока, движущегося с большей скоростью в горизонтальном воздуховоде, потоку в вертикальном канале. Эжектор, работая по закону Бернулли, создает 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°) 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° 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

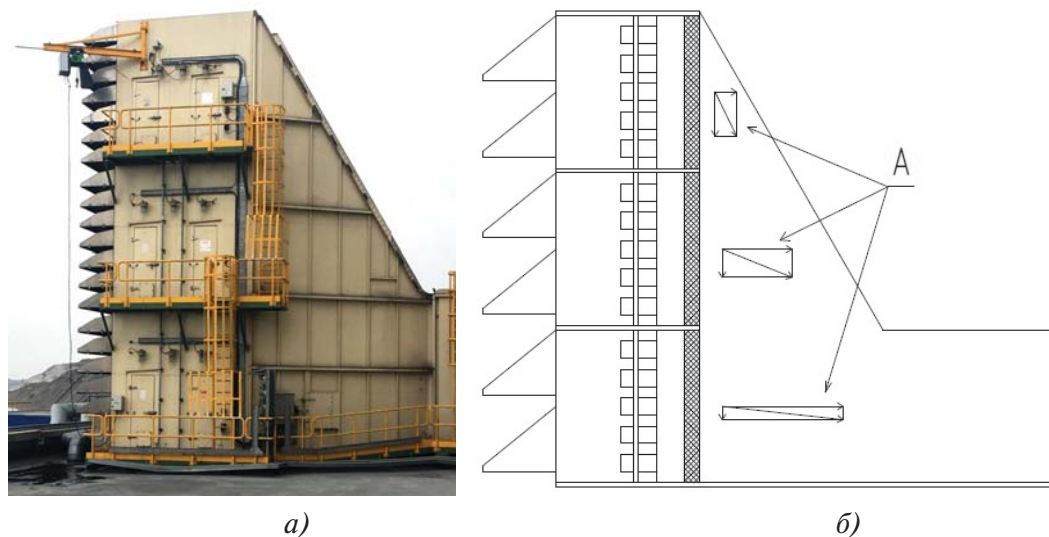


Рис. 2.59. КВОУ В: а) воздуховод на уровне верхнего яруса КВОУ; б) схема КВОУ В с треугольниками скоростей после фильтров

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, неоптимальные, с точки зрения расчетных (проектных), скорости воздушного потока на входе в воздушные фильтры приносят с собой большое количество загрязняющих веществ, что негативно сказывается на жизненном цикле фильтров. 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, — трудновыполнимая 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, ни с экономической точки зрения нецелесообразно.

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

Рассмотрим характерный пример. Известно, что в процессе эксплуатации КВОУ ГТУ нередки 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 этом же фильтр-боксе установлены приемные устройства датчиков, фиксирующих перепад давления на фильтрах в КВОУ. В результате произошел резкий скачок 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 обесточиванием промышленных объектов и жилых домов? И это все из-за одного выпавшего фильтра.

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

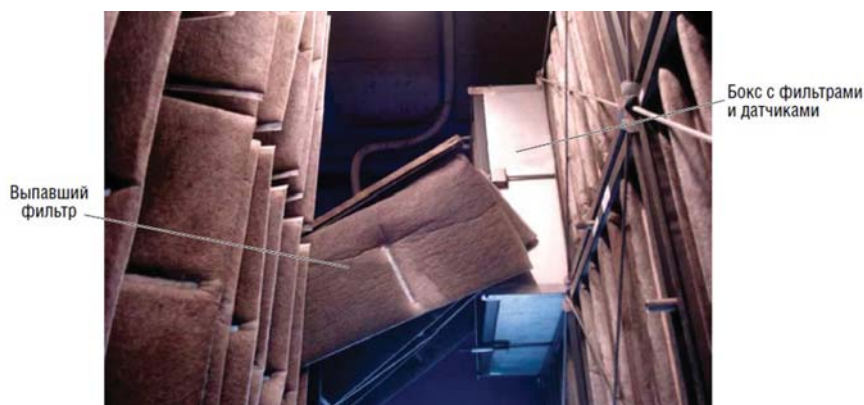


Рис. 2.60. Выпадение фильтра коагулятора и дросселирование им фильтров второй и третьей ступени очистки циклового воздуха ГТУ

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 на зиму с КВОУ ГТУ противомоскитные сетки



а)



б)

Рис. 2.62. Крепление фильтров в КВОУ ржавыми фиксаторами:
а) фильтр грубой очистки; б) фильтр тонкой очистки класса E11

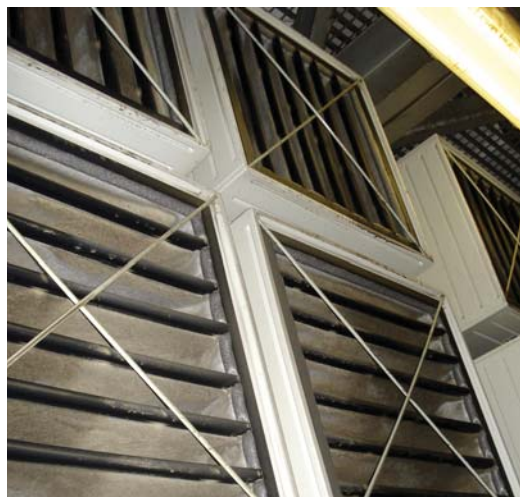


Рис. 2.63. Неправильная установка фильтров в КВОУ ГТУ



а)



б)

Рис. 2.64. Негерметичность 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 следует во всех бедах винить только фильтры, а нужно проанализировать все возможные причины проникновения загрязнений в проточную часть турбомашин.



Рис. 2.67. Загрязненные лопатки ВНА ГТУ

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

Кто-то когда-то назвал фильтры и КВОУ вспомогательным оборудованием для ГТУ. Да, *оно вспомогательное, но далеко не второстепенное*. Без воздушных фильтров и КВОУ невозможно обеспечить надежную и эффективную работу энергетической ГТУ. Эта такая же их потребность, как для 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 документа «Общие технические требования 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 приведена таблица рекомендаций по комплектации КВОУ для энергетических ГТУ, используемых на объектах РАО ЕЭС. Согласно этим рекомендациям, на территории России повсеместно необходимо использование статической системы фильтрации КВОУ, за исключением районов пустынь, где целесообразно применение импульсной системы фильтрации воздуха.

3.1. Импульсные системы очистки воздуха энергетических ГТУ



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

Воздушные фильтры с импульсной очисткой были разработаны после случаев остановки оборудования из-за резкого повышения перепада давления на статических фильтрующих системах, обусловленного полным их блокированием песком во время песчаных бурь в районах Ближнего Востока (рис. 3.1).

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



а)

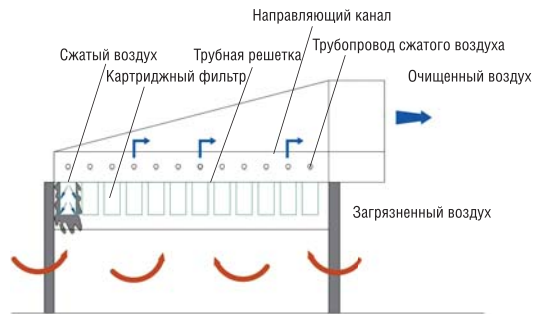


б)

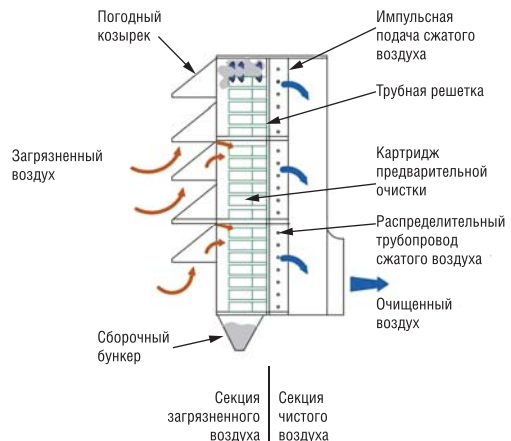
Рис. 3.2. Кувейт: а) в обычную погоду; б) во время песчаной бури

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

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 поступают через хоппер (сборочный бункер) в специальные емкости для их сбора.



а)



б)

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

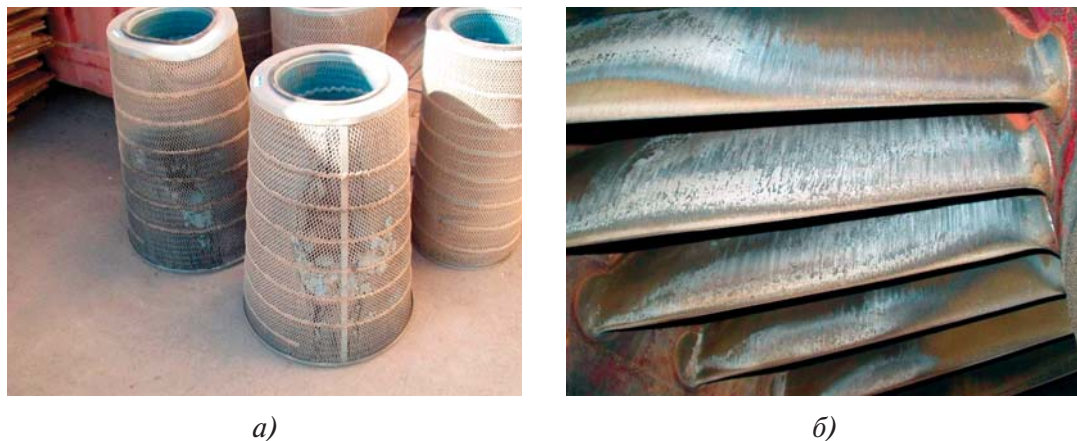


Рис. 3.4. ГТУ V94.2A: а) импульсные фильтры; б) эрозийный износ лопаток компрессора

В 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 рис. 3.4б зафиксирован эрозийный износ лопаток осевого компрессора ГТУ Siemens V94.2A в Омане при использовании в системе фильтрации воздуха КВОУ импульсных фильтров [3].

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 на Южной ТЭЦ Санкт-Петербурга. Поставщиком оборудования являлась компания АВВ (Asea Brown Bover). При расходе воздуха ГТУ 183 кг/с, КВОУ было оснащено 192 коническими Р19-1281 и цилиндрическими Р19-1280 фильтрами компании Donaldson (США, рис. 3.5).

Для подачи сжатого воздуха в систему импульсной очистки (для продувки фильтров) КВОУ было оборудовано отдельно стоящим компрессором фирмы Atlas Copco [3]. За время эксплуатации наработка ГТУ достигла 2000 часов, при этом энергетическая установка эксплуатировалась только в зимний период, когда содержание пыли в воздухе 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



Рис. 3.5. Импульсные фильтры



Рис. 3.6. КВОУ Сочинской ТЭС

из-за загрязнения проточной части компрессора ГТУ перестала эксплуатироваться и находилась в резерве в течение нескольких лет, а впоследствии была демонтирована.

В декабре 2004 года в опытно-промышленную эксплуатацию были запущены два энергоблока Сочинской ТЭС, в состав которых входят ГТУ GT-10С (Siemens) мощностью 28,3 МВт. ГТУ оснащены КВОУ с двухсторонним 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].

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 атмосфере, имеют диаметр менее 10 мкм. Технические характеристики системы очистки воздуха ГТУ GT-10С приведены в Таблице 3.1

Расход воздуха через КВОУ, кг/с	90
Количество пар фильтр-элементов	112
Начальное сопротивление воздушного потока, мм вод. ст.	30
Расчетное стабилизированное падение давления, мм вод. ст.	90
Тип фильтрующего элемента (Donaldson)	P78-3302-604508 (цилиндрический) P78-3301-604508 (конический)
Класс фильтрации	F9
Интервал между импульсами, с	32
Длительность импульса, с	0,1
Кол-во ступеней фильтрации	1
Кол-во пылевых вентиляторов	4
Потребляемая электрическая мощность пылевого вентилятора, кВт	0,75

сферном воздухе, имеют размер 0,3–0,5 мкм, а частиц размером более 10 мкм лишь 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 попадают 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 3 м. В нормальных условиях крупные частицы крайне редко достигают высоты более 8 м. В заключение 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 составе атмосферного воздуха 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.

КВОУ для Сочинской ТЭС поставлены без устройства по предупреждению налипания снега на входном диффузоре (козырек рециркуляции горячего воздуха, *рис. 3.б*). Как показали события нескольких зим (сильнейшие снегопады и обледенение, приведшие к нарушению энергоснабжения Сочи), такое конструктивное решение не является оптимальным.

В целях увеличения времени безотказной работы и продления срока службы системы фильтрации КВОУ персоналом Сочинской ТЭС проводились регулярные очистки фильтров промышленным пылесосом (каждые два месяца). Работы совмещаются с ежемесячной промывкой проточной части компрессора.

Санкт-Петербург и Сочи – приморские города, 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 ТЭС, работающих в прибрежных (onshore) зонах.

В октябре 2013 г. в строй была введена Дзубгинская ТЭС, которая была построена в соответствии с «Программой строительства олимпийских объектов и развития города Сочи как горноклиматического ку-

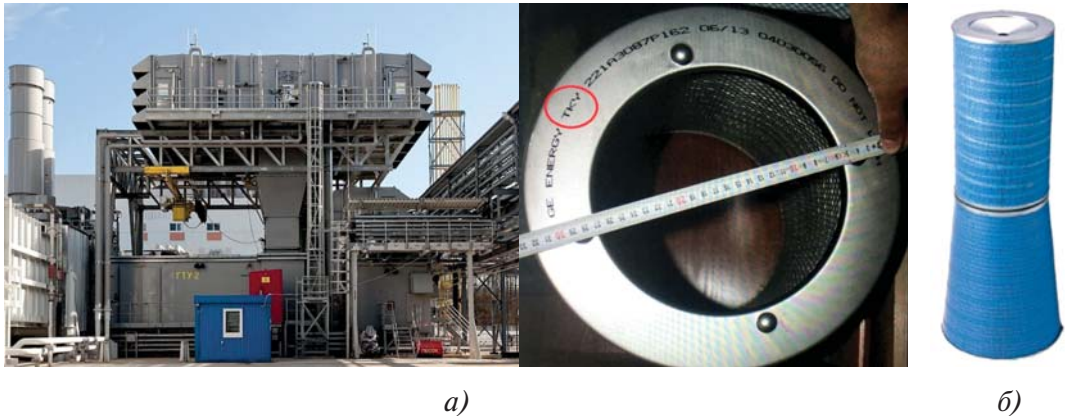


Рис. 3.7. КВОУ ГТУ LMS 100 PB Джубгинской ТЭС (<https://clck.ru/33anno>);
а) общий вид; б) воздушный импульсный фильтр

порта», утвержденной Постановлением Правительства РФ от 29 декабря 2007 г. № 991. Установленная электрическая мощность 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 явилась компания Mikropor (Турция – ТКУ).

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

В табл. 3.2 приведены технические характеристики воздушных импульсных фильтров (рис. 3.7б), установленных на Джубгинской ТЭС.

В состав другой энергетической компании входят Сургутская и Шатурская ГРЭС с ПГУ, на которых установлены КВОУ с импульсной системой очистки циклового воздуха ГТУ PG935FA GE Energy [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 находится в Ханты-Мансийском автономном округе Тюменской области в центральной части Западно-Сибирской низменности, в среднем Приобье. Климат района резко континентальный, характеризуется суровой продолжительной зимой и коротким, относительно теплым летом.

Технические характеристики воздушных импульсных фильтров

Таблица 3.2

Номинальный расход воздуха, м ³ /ч	2500
Класс фильтрации (по EN779-2012)	F9
Сопrotивление фильтра, Па:	
– начальное	193
– конечное	450
Эффективная площадь фильтрации, м ²	42,6
Эффективность фильтра на частицах 0,4 мкм (по EN779-2012), %:	
– начальная	89
– средняя	97,0
Способность к пылеудержанию (по EN779-2012), %	99,99
Фильтрующий материал	Стекловолокно
Пылеемкость, г	1893
Габаритные размеры фильтра, включая размеры уплотнения, мм	
– высота	1350
– высота уплотнения	14
– наружный диаметр	324
– диаметр конуса	444
Уплотнение фильтра	Кольцевое из полиуретана
Наличие защитной сетки	Есть
Конструктивные элементы фильтра	Оцинкованная сталь

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

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

Как видим, обе ГРЭС находятся в различных климатических условиях. Общим для них является расположение на берегах рек и водоемов, что является источником повышенной влажности атмосферного воздуха.

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



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

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.

Другой проблемой 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).

Технические характеристики воздушных импульсных фильтров

Таблица 3.3

Номинальная потеря давления на новом воздушном фильтре, кПа		0,495
Максимальная потеря давления на фильтре, требующем замены, кПа		0,996
Максимально допустимые размеры частиц при обеспечении качества подаваемого воздуха, мкм	Наиболее крупные	> 10
	Крупные	2,5–5
	Мелкие	0,1–2,5
	Очень мелкие	< 0,1



а)



б)

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



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

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 то же 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).

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

Целью данного исследования являлся поиск альтернативы импульсным фильтрам GE Energy USA ввиду неудовлетворительной работы системы фильтрации ГТУ GE PG935FA. Исследовались новый

импульсный фильтр GE Energy USA, взятый с Шатурской ГРЭС, и аналогичный фильтр GE Energy TKY производства Mikropor.

В план работ входило определение и сравнение массогабаритных показателей обоих 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).

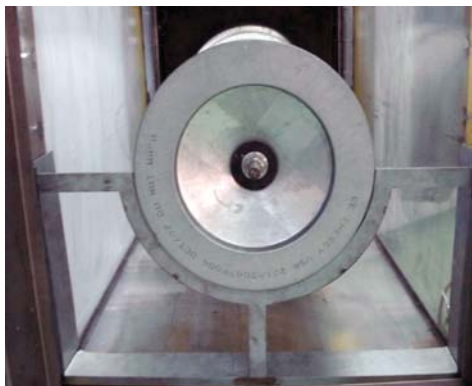
Тестирование фильтров производилось на испытательном стенде Mikropor в Анкаре (Турция). На рис. 3.11 представлены фото испытанных фильтров.

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

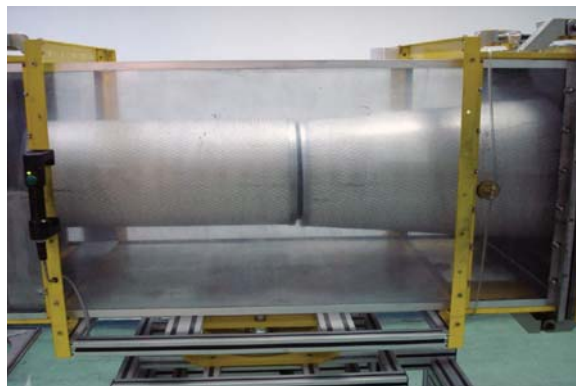
– импульсные фильтры компании Mikropor и GE USA имеют идентичные габаритные размеры;

Технические характеристики импульсных фильтров GE (USA) и GE (TKY) Таблица 3.4

Технический параметр	GE ENERGY TKY 221A3087P063 (Mikropor)		GE ENERGY USA 221A3087P004
	Паспорт	Замер	
Наружный диаметр цилиндрического фильтра, мм	324	324	324
	216	214	212
Диаметр конического фильтра, мм:			
	– наружный	445	444
– внутренний	330	331	327
Высота обоих фильтров, мм	660	661	661
Металлические части фильтра	Оцинкованная сталь		
Фильтровальный материал	Синтетическое волокно с добавлением стекловолокна		Нет информации
Наружный диаметр прокладки, мм	285		281
Высота прокладки, мм	12		11,3
Глубина плиссировки фильтровального материала, мм	46,5		48
Масса фильтра (цилиндрического/конического), г	12 803 (5971/6832)		13 636 (6348/7288)
Начальный перепад давления, Па	145	150	183
Номинальный расход воздуха, м ³ /ч	2600		2600
Эффективность очистки фильтра, %	77,1		38,5
Энергоэффективность фильтра, кВт·ч	1301		1583



а)



б)

Рис. 3.11. Импульсные фильтры на испытательном стенде компании Mikrogor:
а) GE Energy USA; б) GE Energy ТКУ

– разница в весе фильтров (833 грамма) обусловлена более тяжелой внутренней и внешней решеткой, обрамляющей фильтр GE USA (просечно-вытяжная оцинкованная сталь);

– фильтр Mikrogor имеет лучшую фиксацию внутренней и внешней решетки (металлическая пластина с точечной сваркой), чем фильтр GE USA (скрутка сетки в узел);

– прокладка фильтра Mikrogor (пена вместо полиуретана) припаяна к корпусу фильтра, а у фильтра GE USA она приклеена;

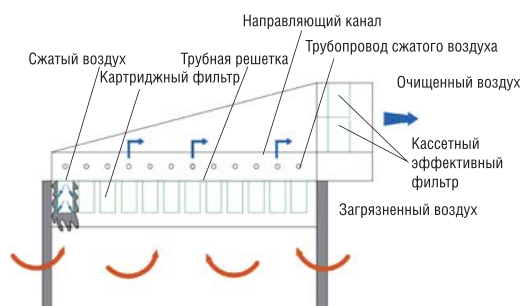
– фильтр Mikrogor, в отличие от фильтра GE USA, имеет более равномерную укладку фильтровального материала;

– начальный перепад давления на фильтре GE USA на 33 Па выше, чем у фильтра Mikrogor. В случае использования фильтров Mikrogor на Шатурской ГРЭС и Сургутской ГРЭС недовыработка электроэнергии ГТУ GE PG9351FA, обусловленная снижением начального перепада давления на фильтрах, уменьшится на 1,69 МВт;

– начальная эффективность фильтра Mikrogor для частиц размером 0,4 мкм в 2 раза выше эффективности фильтра GE Energy USA;

– энергоэффективность фильтра Mikrogor выше, чем у фильтра GE USA на 282 кВт·ч. В случае применения фильтров Mikrogor на Шатурской ГРЭС (756 фильтров в одном КБОУ) ежегодная выработка электроэнергии ГТУ GE PG9351FA повысится на 213,2 МВт·ч. Для Сургутской ГРЭС (1512 фильтров в двух КБОУ) эта величина составит 426,4 МВт·ч.

Чтобы избежать сильного загрязнения и эрозийного износа компрессорных лопаток, как было зафиксировано на осевом компрессоре GE



а)



б)

Рис. 3.12. КВОУ с импульсными и статическими фильтрами, всас: а) снизу; б) осевой (рис. «б» из буклета компании Camfil Svenska)

PG935FA (рис. 3.10), строго рекомендуется поместить за фильтрами импульсной очистки конечную ступень статических фильтров группы ЕРА класса Е10 для обеспечения необходимой защиты компрессора ГТУ (рис. 3.12).

Суммируя все вышесказанное по КВОУ с фильтрами импульсного типа, необходимо отметить следующее:

- в экстремальных условиях пыльных бурь импульсные фильтры работают эффективно, в обычных климатических условиях их эффективность мала;

- 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;

- фильтрующий материал из стекловолна в импульсных фильтрах применяется редко из-за его возможного разрушения при воздушных импульсах;

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

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.

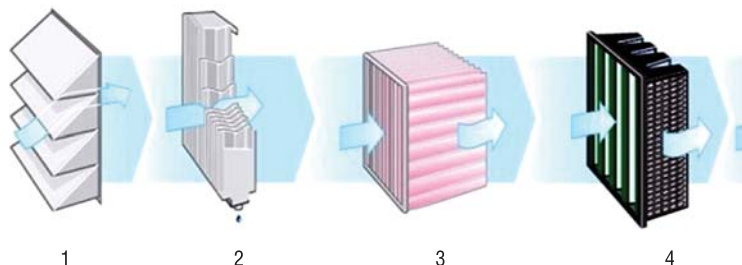


Рис. 3.13. Система фильтрации циклового воздуха ГТУ: 1 – погодные козырьки, 2 – жалюзийный каплеуловитель, 3 – карманный ФГО/ФСО, 4 – кассетный ФТО (рис. из буклета компании Camfil Svenska)

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



а)



б)

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

силы гравитации стекает вниз по пластинам. Специальная конструкция профиля каплеуловителей повышает эффективность отделения более мелких капель и обеспечивает свободное стекание жидкости (рис. 3.14).

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 крупные и средние дисперсные частицы 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 F (T7-T9) до 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. КБОУ 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 (T7-T9), а третью ступень представляют фильтры класса E10-E12 (T10-T12) согласно ГОСТ Р EN 1822-1-2010 (ISO 29461-1). Такая же система фильтрации циклового воздуха ГТУ применяется и при отсутствии в КБОУ штатных кап-

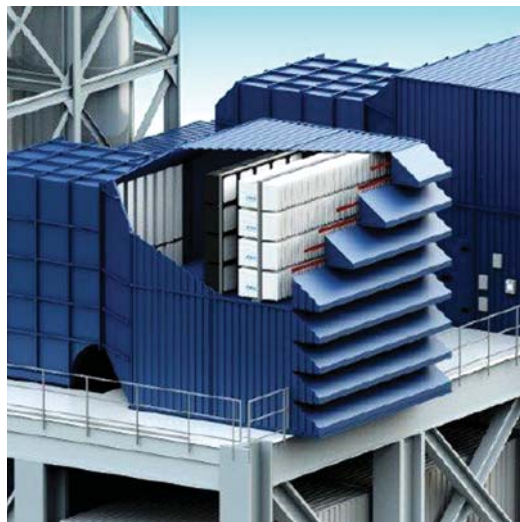


Рис. 3.17. КВОУ с трехступенчатой системой фильтрации (рис. из буклета компании Freudenberg Filtration Technologies)

Одним из них является размещение нескольких ступеней фильтрации на одной стене КВОУ, что позволяет уменьшить осевые размеры устройства, а также его вес и стоимость металлоконструкций. Совмещение нескольких ступеней фильтрации в одной конструкции получило название комбинированной системы фильтрации (КСФ). Рассмотрим наиболее часто применяемые из них, оценим их достоинства и недостатки.

3.2.1. Комбинированные системы фильтрации

Патент на полезную модель «Комбинированная система фильтрации» был получен 20.01.2009 [8]. КСФ предусматривает размещение трех ступеней фильтрации в одном пластмассовом корпусе и предназначена для подготовки циклового воздуха газоперекачивающих агрегатов. 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, соответствует 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. Фильтры первой и второй ступени в корпусе КСФ фиксируются стержнями, размещенными по диагонали со стороны входа воздуха. Третья

леуловителей (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.

С ростом количества ступеней фильтрации осевые размеры КВОУ увеличиваются, растут массогабаритные показатели и стоимость. Одной из существенных статей расхода при изготовлении КВОУ являются металлоконструкции из нержавеющей, оцинкованной и низкоуглеродистой стали. Для снижения веса и стоимости КВОУ для ГТУ используются различные конструктивные реше-



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

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 [9].

В статье [10] отмечается, что КСФ нашла широкое применение на КС, что позволило существенно снизить 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, их площадь не превышает 15 % территории нашей страны.

Однако, как показал опыт эксплуатации ГПА выше этой линии, при температуре атмосферного воздуха ниже $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 неэкстремальные климатические условия в этом регионе, 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].

Проблемы, выявленные в процессе эксплуатации КСФ, обусловлены как конструкцией самой трехступенчатой системы фильтрации, размещенной в одном корпусе, так и конструктивными ошибками антиобледенительной системы (АОС) ВОУ и КВОУ, приводящими к ее



а)



б)

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

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 быть примерно 800–1000 мм. Именно по этой причине впоследствии 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 фото *рис. 3.20*, сделанном в КВОУ энергетической ГТУ, видно, что все ФТО в КСФ мокрые.

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

Как видно на *рис. 3.21а*, в коробе скапливается большое количество влажных отложений крупных ча-

стиц, не очищенных ФГО, которые попадают в ФТО (рис. 3.21б). Очевидно, ФГО класса G4 не обеспечивает заданный уровень очистки воздуха перед ФТО класса F9. В результате 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 ЕН 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.*

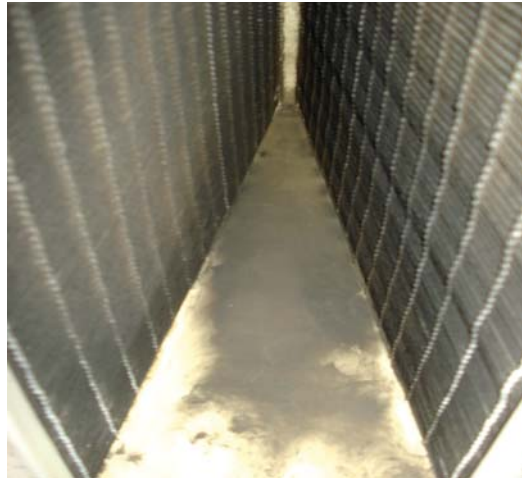
В паспорте фильтр-бокса производителя КСФ написано: «Корпус пластиковый. Компоненты



Рис. 3.20. Раздельная установка фильтра-коагулятора и КСФ



а)



б)

Рис. 3.21. Двухступенчатая КСФ: а) состояние ФГО и коробка; б) состояние ФТО

корпуса включают в себя следующие вещества: полистирол, синтетическое волокно, полиуретан, стеклопластик, эфир уксусной кислоты». И что из этого следует? Практически ничего: нет 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 записано – «пластиковая рамка».

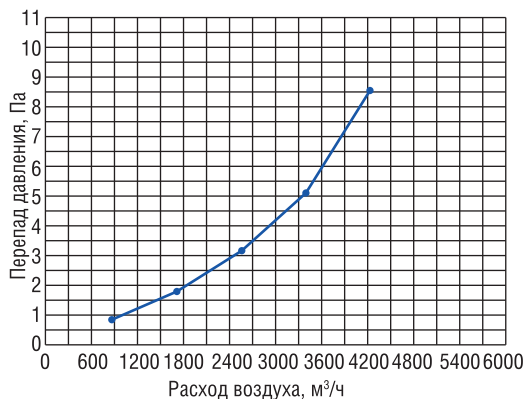


Рис. 3.22. Перепад давления на боксе КСФ

В паспорте КСФ в разделе гарантии записано, 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 ЕН 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].

Как видно из представленных фотографий, основными недостатками конструкции этих фильтр-боксов являются неоптимальная толщина листовая пластмассы и, как следствие, ее ломкость, некачественная приварка составных частей конструкции, ее негерметичность, 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 причинам повреждений фильтр-боксов.

Для обеспечения необходимой прочности конструкции фильтр-боксов другие производители этой продукции применяют монолитную кон-



а)



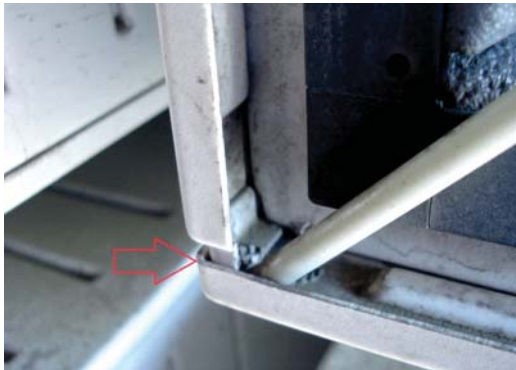
б)



в)



г)



д)

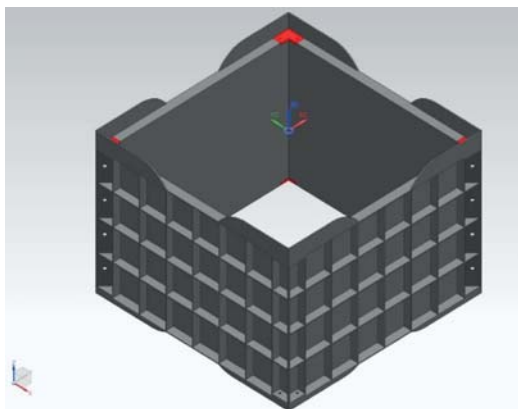


е)

Рис. 3.23. Типичные повреждения фильтр-бокса 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 в корпусе



Рис. 3.24. Поврежденные рамки фильтр-коагуляторов Poret



а)



б)

Рис. 3.25. Фильтр-бокс компании Mikropor: а) 3D-макет; б) в КВОУ энергетической ГТУ

струкцию с ребрами жесткости (рис. 3.25а) и оптимальной толщиной материала (рис. 3.25б).

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 семи лет и продолжают эксплуатироваться без каких-либо повреждений.

АБС (акрилонитрилбутадиеновый) пластик $(C_8H_8)_X \cdot (C_4H_6)_Y \cdot (C_3H_3N)_Z$ – 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. 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-плас-

тик 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. Рекомендуется 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 нестойкость к ультрафиолетовому излучению, пониженные электроизоляционные свойства 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 из эксплуатации в истории США.

Аналогичные данные с техническими характеристиками должны записываться 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 сложных мерительных инструментов.

В соответствии с ГОСТ 24622-91 (ИСО 2039/2-87) и ГОСТ 24621-2015 (ИСО 868:2003) твердость пластмасс может определяться по Роквеллу и Шору [16, 17]. Эти методы являются эмпирическими испытаниями, предназначенными прежде всего для контроля. Их принцип заключается в измерении глубины вдавливания в материал определенного индентора



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

близким аналогом патентуемого решения является формула первого патента [8], недостатком которого, по мнению заявителя, является небольшая площадь фильтровального материала фильтра грубой очистки второй степени 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, надеваемый на ФГО, как это показано на рис. 3.27.

В данном техническом решении, в отличие от аналога, целесообразно отметить отказ от единого корпуса размещения воздушных фильтров. Опыт эксплуатации пластмассовых корпусов для систем фильтрации воздуха показал их хрупкость и недолговечность из-за 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. 3.22).

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).

Заявка на полезную модель «Устройство очистки воздуха (варианты)» была получена 25.04.2014, а затем был выдан патент отечественной компании Ф [18]. Как отмечено в этом документе, наиболее

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 в КВОУ ГТУ (рис. 3.27) 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 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-коагу-



а)



б)

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

лятора, ввиду его увеличенной площади. В случае сильного загрязнения чехла несгоревшими углеводородами потребуется его регенерация (стирка), которая может привести к деформации.

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 ФГО в этих технических решениях.

Очевидно, что предлагаемые в этих патентах технические решения не могут быть в полной мере использованы в электроэнергетике из-за 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 ступени очистки воздуха от атмосферной влаги (лагоотделители или коагуляторы) и комбисистемы, включающей ФГО и ФТО. Как показал опыт эксплуатации комбинированных систем фильтрации разных производителей для КВОУ ГТУ, существенное значение на эффективность и срок службы оказывает способ их крепления друг к другу.

В 2013 году на нововведенную ТЭС на берегу Черного моря были поставлены двухступенчатые КСФ иностранной компании VA, рекламирующей разработанное ею крепление ФГО к ФТО, позволяющее быстро устанавливать и снимать панельные фильтры грубой очистки (рис. 3.28а). На деле это крепление представляло собой обыкновенные «липучки», прикрепленные по краям ФГО и ФТО на двухсторонний скотч. Действительно, снятие и установка ФГО первоначально проходила быстро, однако надежность и долговечность такого незамысловатого крепления фильтров оказались минимальны.

Во время возведения олимпийских объектов в этом месте загрязненность воздуха была достаточно высокой по причине близкого расположения к ТЭС нескольких цементно-раздаточных узлов, интенсивного движения грузового автотранспорта и поднимаемой им в воздух пыли. В результате этого 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, приклеивая «липучки» 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, приводившее к росту перепада давления и снижению срока жизненного цикла. Впоследствии комбинистемы 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 с теплым климатом на ТЭС было зафиксировано всего несколько (6–8) поломок пластмассового 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, в).

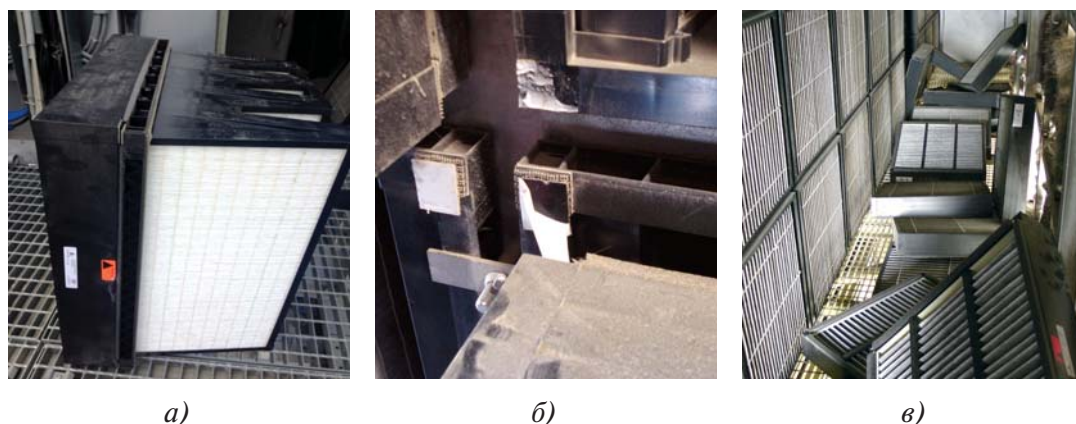


Рис. 3.28. Комбинированная система иностранной компании VA: а) внешний вид; б) отрыв «липучек» фильтров в КВОУ; в) массовое выпадение ФГО в КВОУ ГТУ ТЭС

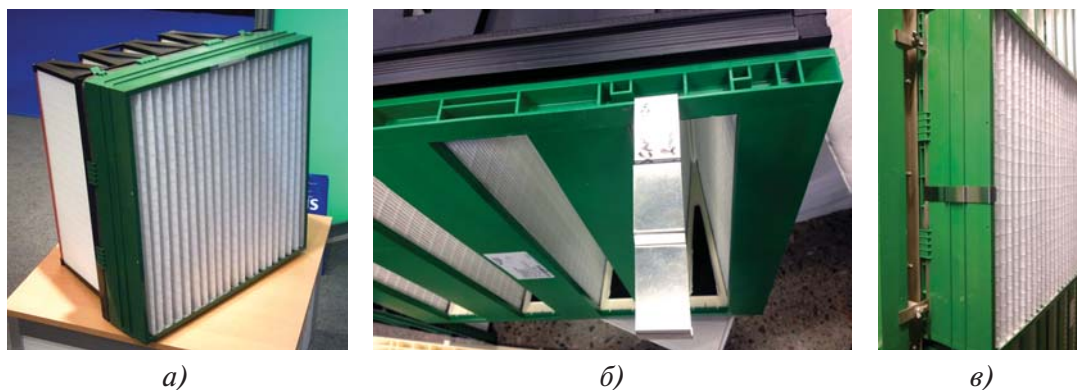


Рис. 3.29. Комбинированная система шведской компании С: а) внешний вид; б), в) механизмы Snap-on крепления ФГО и ФТО

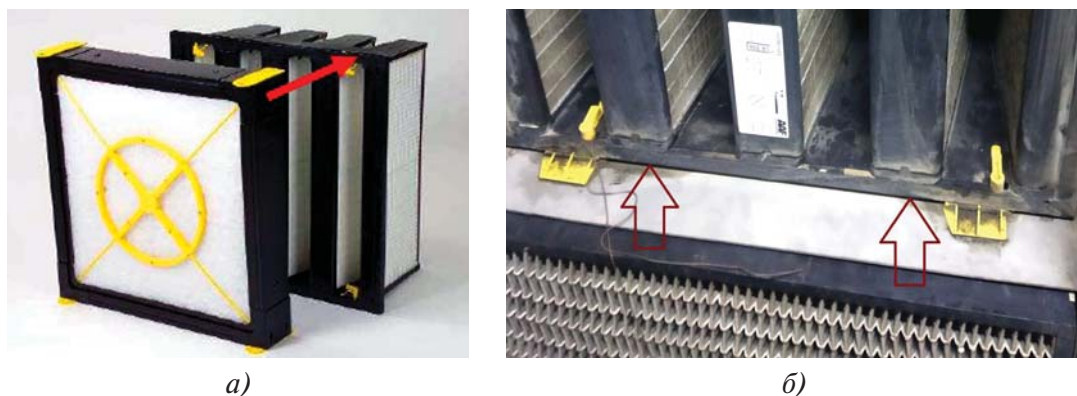


Рис. 3.30. Крепление ФТО в комбинированной системе Easy Care американской компании ААF: а) внешний вид; б) крепление фильтров механизмом Easy Fit

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

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 поворотом их на 90°. Перед установкой предфильтра М80 желтое защитное кольцо на нем снимается, после чего он крепится к ФТО с помощью полозьев (желтого цвета), закрепленных на корпусе ФГО (рис. 3.30а). Как видно на рис. 3.30б, из-за размещения матрицы под металлическим боксом образуется щель, 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



а)



б)

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

с матрицей нельзя назвать герметичным или оптимальным. Кроме того, американский производитель этой системы фильтрации обращает внимание потребителей на недопущение потери пластмассовых штырей и матриц в процессе монтажа / демонтажа фильтров и попадания их в воздухопровод или проточную часть ГТУ.

Некоторые производители воздушных фильтров, такие, как финская компания EF и немецкая FFT, предпочитают крепить предфильтры 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 M модульная система (рис. 3.31б) представляет собой связку ФТО F7 и ЕРА-фильтра класса E10 согласно ГОСТ Р ЕН 779-2014.

Другой финский производитель фильтров, компания AF предлагал крепление панельного предфильтра класса G4 прижатием его к ФТО с помощью металлической пружины, прикрепленной к корпусу фильтр-бокса (рис. 3.32). Надо полагать, что эта пружина должна быть изготовлена из нержавеющей (легированной) пружинной стали. В противном случае она быстро подверглась бы 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

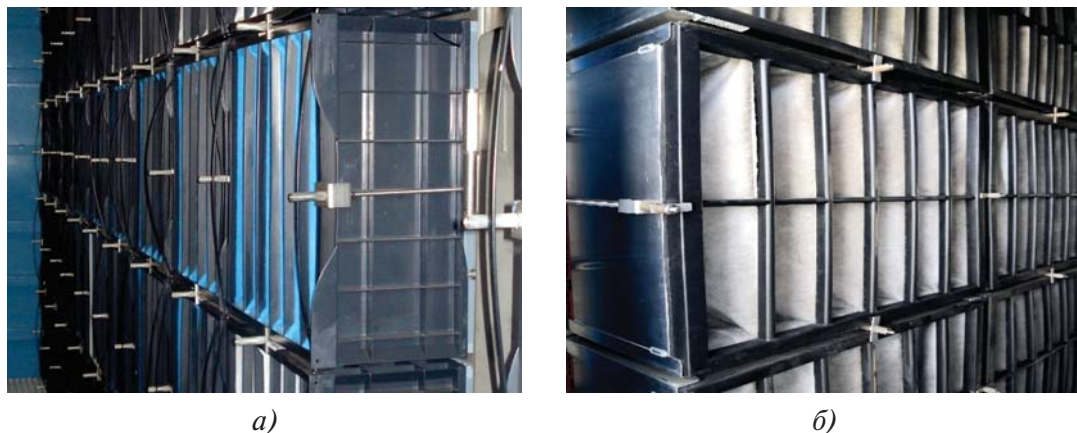


Рис. 3.33. Размещение фильтров в фильтр-боксах КСФ: а) в пластмассовом корпусе турецкой компании Mikropor; б) в корпусе из нержавеющей стали производителя КВОУ немецкой компании FAIST AIS

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

- трех- и двухступенчатые комбисистемы;
- 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 из прочной пластмассы АБС с усиленными ребрами жесткости или из нержавеющей стали, поставленные вместе с КВОУ их производителями (рис. 3.33).

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 этими фильтрами, целесообразно в качестве фильтровального материала для них выбирать синтетическое волокно, обладающее гидрофобностью (отталкивающее 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 ограничена по применению для контактов с водой. Polyether, напротив, устойчива к гидролизу и другим формам химических и окружающих воздействий. Они успешно используются как ловители тумана, увлажнители воздуха, для 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.

Для увеличения площади фильтрации таких коагуляторов используется зигзагообразный (Z-образный) вспененный полиуретан. Кроме того, вертикальные Z-образные складки позволяют ориентировать дождевые атмосферные осадки сверху вниз по фильтровальному материалу и дальше отводить влагу в дренажную систему КВОУ. На рис. 3.34а зафиксирована неправильная установка фильтров матов Poret PPI 10 в КВОУ энергетической ГТУ. Технические характеристики фильтров коагуляторов типа Poret приведены в табл. 3.5.



а)



б)

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

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

Номинальный расход воздуха, м ³ /ч	3400
Перепад давления, Па	
– начальный	38
– конечный	250
Площадь фильтрации, м ²	0,35
Класс очистки	G2
Фильтрующий материал	Вспененный полиуретан
Водонепроницаемость, %	100
Эффективность захвата 10 мкм капель, %	99
Эффективность захвата пыли	Низкая
Температура использования, °С, не выше	+80
Габаритные размеры (Ш×В×Д), мм	592×592×94

Согласно паспортным данным, у этих фильтров гарантийный срок эксплуатации не менее трех месяцев со дня ввода в эксплуатацию, кроме случаев повышенной запыленности атмосферного воздуха. Производители этой продукции особо отмечают, что данный тип фильтров-коагуляторов, изготовленных из пористого полиуретана, может регенерироваться (мыться) 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 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 610×610×75 мм, класса G2. На рис. 3.35 представлены кривые фракционной эффективности и перепада давления в зависимости от расхода воздуха через фильтр [19].

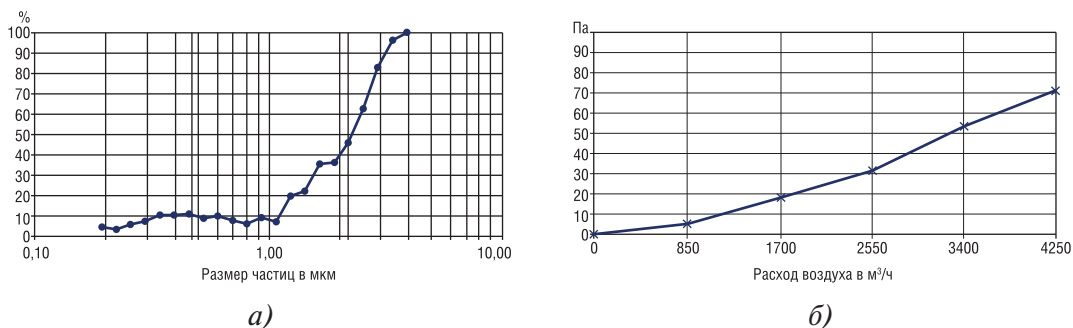


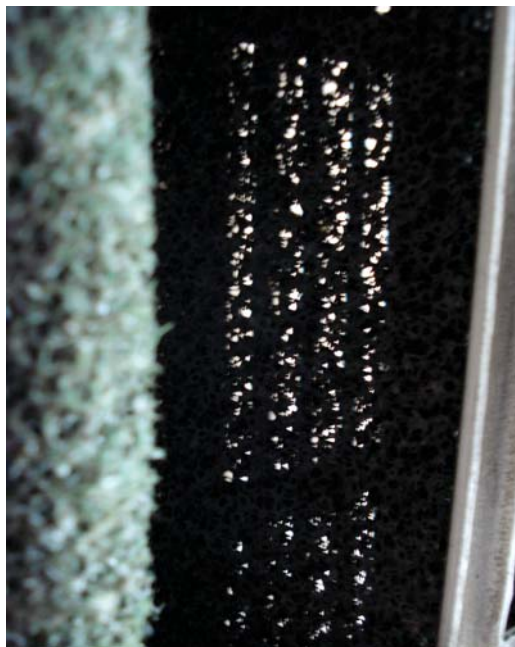
Рис. 3.35. Результаты тестирования фильтра-коагулятора Poret PPI 10 на: а) эффективность; б) начальный перепад давления

Как видно из представленных графиков, эффективность улавливания частиц фильтр-матом действительно небольшая и заметный эффект появляется для частиц размером 2 мкм. 100 %-ная 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 поставляют маты как с вертикальной, так и с 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 фильтр-матов в пластмассовой рамке показывает несостоятельность такого объяснения (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 (ТОР – верх). Поставщик,



а)



б)

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

выполняя это требование стандарта, указывает «ТОР» именно так, чтобы фильтр был установлен в КВОУ с вертикальным расположением Z-линий вспененного полиуретана. Такую же информацию можно найти и на сайте производителя. Таким образом, объяснение поставщика, что эффективность влагоудаления идентична при горизонтальной и вертикальной установке зигзагообразного фильтровального материала, не соответствует действительности. Просто имеет место тривиальная ошибка производителя при разделке (cut-to-size section) пористого полиуретана и несоблюдение ориентации Z-линий.

Как показал опыт эксплуатации, атмосферная влага при вертикальной установке зигзагообразного вспененного полиуретана отводится быстрее, чем при горизонтальном, поскольку 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.

На рис. 3.36б 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 %-ной водонепроницаемости не соответствуют действительности. На 3.36б зафиксировано, что фильтр из пористого полиуретана пропускает не только 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 различных 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)

Таблица 3.6

Размер частиц, мкм	Кол-во частиц в м ³ для конкретной дисперсности		Отношение кол-ва частиц за/перед коагулятором	Концентрация частиц, мг/м ³		Проскок
	На всасе КВОУ	За коагулятором		На всасе КВОУ	За коагулятором	
0,3	15 353 360	14 812 720	1,0	1	1	1
0,5	2 051 590	2 453 710	1,2	1	1	1
1,0	512 014	1 472 792	2,9	3	10	3,3
3,0	44 523	902 474	20,3	3	69	23
5,0	17 314	867 484	49,8	8	399	49,9
10,0	3534	121 201	34,3	8	263	32,9
Всего	17 982 330	20 624 380	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 приведет 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 PPI 10 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 49,9 говорит о скачкообразном насыщении (повышении концентрации) воздушного потока за счет частиц этого размера, вытесненных из коагулятора PPI 10. 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 на фильтре пыли увеличивается, то проявляются следующие дополнительные эффекты:

– влетающая частица может ударить по ранее захваченной частице и выбить ее в воздушный поток;

– 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;

– 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 столь 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 их работы. Хотя на многих электростанциях стали замечать, что эффективность этих фильтров после регенерации падает раз от раза. При этом фильтры зарекомендовали себя хорошо во время весеннего цветения растений и появления двукрылых насекомых. 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 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 недостатков фильтров из вспененного полиуретана является их набухание атмосферными осадками и выпадение из пластмассовых рамок и ячеек КВОУ ГТУ (рис. 3.37б).

Следует обратить внимание, что вспененный полиуретан пожароопасен, поэтому для снижения вероятности воспламенения его стали покрывать меламином, температура плавления которого примерно 350 °С. Это новшество в производстве фильтров-коагуляторов появилось после пожара на одной из зарубежных ТЭЦ во время сварочных работ. После попадания искры вспененный полиуретан воспламенился, в результате 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 рекомендует осуществлять регенерацию таких фильтров до 8 раз. Уже после первой регенерации защитная меламиновая пленка (если она была нанесена) разрушается, и полиуретановые фильтры становятся пожароопасными. Об этом должны помнить все пользователи, тем более после пожара на КВОУ Ивановских ПГУ в 2021 г., произошедшего также во время сварочных работ [20].

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



а)



б)

Рис. 3.37. Фильтры Poret PPI 10:
а) блокированы тополиным пухом;
б) выпадение из ячеек КВОУ [19]



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

В заключение сказанного целесообразно отметить следующее:

- коагуляторы, изготовленные из пористого полиуретана, не обладают необходимой эффективностью очистки воздуха от загрязняющих частиц и атмосферных осадков;
- пористый полиуретан является горючим материалом, при эксплуатации которого необходимо соблюдать меры пожарной безопасности.

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 FAIST AIS выпустила ряд Technical Information Letter (TIL) – Технических информационных 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,



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

то в работе фильтров могут произойти непредвиденные сбои. Поэтому FAIST AIS настоятельно рекомендует придерживаться изложенных требований.

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

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

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 из высокопрочной пластмассы или 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).

Технические характеристики фильтров-коагуляторов грубой очистки Таблица 3.7

Параметры	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, кв. м: – 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	
Уплотнитель	Бесшовный полиуретан	На боковых гранях плоский (либо рамки с направляющими)	
Материал рамки	Пластик	Пластик или алюминий	
Конструктивные особенности	Карманы термопаяные, без прошивки	Складки материала должны быть равномерно разделены термоклеевыми или пластиковыми сепараторами	

Карманы фильтров – термопаяные, 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.

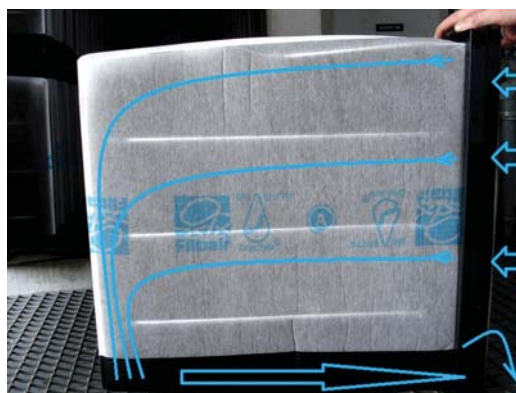
Одним из таких карманных фильтров-коагуляторов является фильтр, изготовленный по технологии Drop-Safe (DS). Помимо того что в нем соблюдено требование отвода атмосферной влаги на грязную сторону воздуха, донная часть карманов гидроизолирована во избежание утечек влаги. Известные фильтры DS имеют два типоразмера карманов: 300 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 фильтрами 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* показаны карманный фильтр, изготовленный по технологии Drop-Safe, а также принцип улавливания и отвода влаги на грязную сторону воздуха.

Атмосферная влага вместе с потоком воздуха поступает в карманы фильтра, где по начертанной траектории оседает на фильтровальном материале, 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 FAIST AIS были проведены статические и динамические испытания воздушных фильтров ряда известных производителей [22]. Динамическим испытаниям были подвергнуты фильтры-коагуляторы, предназначенные для предотвращения поступления атмосферной влаги в КВОУ ГТУ. Фильтры тестировались водяным туманом, образующимся в результате подачи распыленной воды через форсунки. Целью



а)



б)

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



а)



б)

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

испытаний было выявление коагуляторов различных производителей наиболее резистентным к влаге фильтровальным материалом.

На рис. 3.41 изображен испытательный стенд, на котором тестировались фильтры-коагуляторы, и форсунки, распыляющие воду.

Форсунки расположены на расстоянии 2,6 метра от места установки фильтра на стенде для образования водяного тумана перед образцом. Вода к форсункам подавалась насосом. Использованная вода дренировалась в две отдельные емкости: в первую отводилась влага на входе в образец (грязная сторона фильтра), во вторую – вода, проникшая через образец (чистая сторона фильтра). Облицовка испытательного стенда органическим стеклом позволяла визуально контролировать процесс 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.

Образцы фильтров тестировались при расходе воздуха $3400 \text{ м}^3/\text{ч}$. Проверялся начальный перепад давления на фильтрах, указанный в их паспортах или на официальном сайте компании-производителя. В момент подачи воды к форсункам включался отсчет времени проведения теста фильтра на водостойкость. Расход воды через форсунки составлял 2 л/мин. 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, отличающиеся радиальными размерами и классом очистки. Параметры испытанных фильтров, которым присвоены условные обозначения, представлены в табл. 3.8.

Технические параметры испытанных фильтров

Таблица 3.8

Обозначение образца	Класс очистки	Тип	Размеры, мм	Состояние фильтра	Фильтровальный материал
Е	G4	панельный	592×592×96	новый	синтетика
FA	M6	карманный	595×595×620	использованный	термоскрепленное синтетическое волокно для технологии Drop-Safe
FFT	M6	карманный	592×592×650	новый	многослойный нетканый материал с прогрессивной структурой из прочных синтетических нитей
M1	G4	панельный	592×592×150	новый	водоотталкивающая синтетика
M2	M5	панельный	592×592×96	новый	водоотталкивающая синтетика
VA	M5	панельный	592×592×150	новый	водоотталкивающая синтетика

Как видно из табл. 3.8, большинство производителей указывают, что для изготовления фильтров-коагуляторов они используют водоотталкивающую синтетику.

Водостойкость материала определяется 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 давлению воды в течение коротких и средних промежутков времени.

Мы рекомендуем отечественным производителям воздушных фильтров, импортирующим фильтровальные материалы, контролировать водостойкость 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 более высокой температуры, 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 заломами или следами складок.

Как показал опыт отечественных производителей фильтров в испытании образцов фильтровального материала по этому стандарту, именно через глубокие заломы и следы складок на ткани в первую очередь происходят протечки воды при тестировании на водостойкость. Применение гидрофобных материалов в фильтрах-коагуляторах приводит к изменению их воздухопроницаемости. Воздухопроницаемость – это скорость воздушного потока, проходящего через площадь испытуемого 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 другие материалы, обладающие 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 испытуемой поверхности 20 кв. см;
- 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 200 Па (рис. 3.42).

Как видно из *табл. 3.9*, воздухопроницаемость гидрофобного материала ниже этого показателя для обычного материала на 36,7 %.

Для первой ступени фильтрации компания FAIST AIS рекомендует использовать панельные складчатые (гофрированные) фильтры-коагуляторы: для плановой замены фильтры-элементы размером 592×592×96 мм и для повышенной эффективности – размером 592×592×150 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 вышеперечисленным параметрам, но и по способам отвода отсепарированной влаги от представленных образцов.



Рис. 3.42. Образец в установке XHF-01C-A

Воздухопроницаемость фильтровального материала

Таблица 3.9

Материал	Класс очистки	Плотность, г/м ²	Воздухопроницаемость, м ³ /м ² /ч
Обычный	G4	200	12592,8
Гидрофобный	G4	200	7974

На *рис. 3.43a* 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.

На образцах M1 и M2 (турецкой компании M) атмосферная влага на входе в фильтр отводится по наклонным скатам, установленным между гофрами фильтровального материала. В отличие от предыдущего способа дренажа влаги образца E (немецкой компании E), этот способ не снижает прочность рамки фильтра, а наклоненные в сторону всаса скаты ускоряют отвод отсепарированной воды от фильтра (*рис. 3.43б*). Компа-



а)

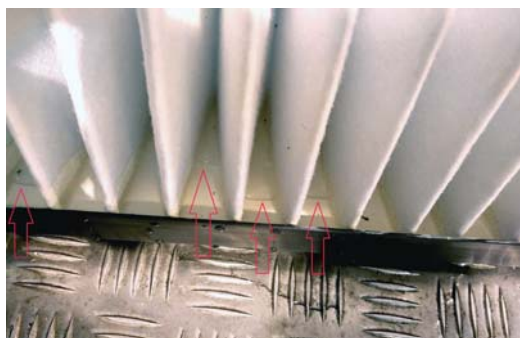


б)

Рис. 3.43. Панельные фильтры: а) образец Е; б) образцы М1 и М2



а)



б)

Рис. 3.44. Образцы фильтров на испытательном стенде: а) VA; б) E, протечка воды

ния 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. 3.44а* изображен образец VA, установленный на испытательном стенде.

В соответствии с рекомендациями компании FAIST AIS у всех представленных образцов складки фильтровального материала разделены термостепными или пластиковыми сепараторами (*рис. 3.43, 3.44*).

Как отмечалось ранее, при динамическом тестировании образцов фильтров на водостойкость расход воды через форсунки составлял 2 л/мин. 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 E (немецкой компании) составляет 35 Па при данном расходе воздуха. Однако в процессе тестирования было установлено, что фактический перепад давле-

ния на фильтре составляет 66 Па, что на 88,6 % превышает заявленный производителем.

На остальных образцах фильтров зафиксированный во время испытаний начальный перепад давления отличался незначительно от данных, указанных на официальных сайтах компаний-производителей (± 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.

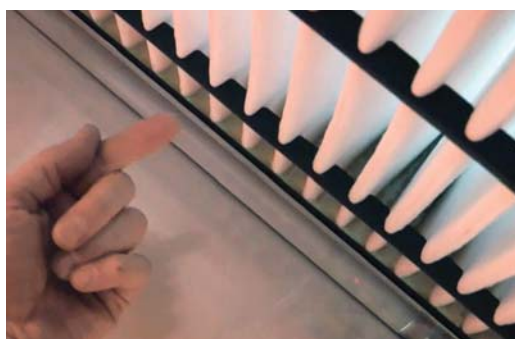
Для сравнения с образцом Е был протестирован фильтр М2 тех же размеров и площади фильтрации. Тест с подачей распыленной воды продолжался в течение 15 минут. За это время протечек влаги через фильтровальный материал и его стык с рамкой фильтра зафиксировано не было.

Образцы М1 и VA по сравнению с предыдущими двумя имеют увеличенные радиальные размеры и площадь фильтрации. Протечка влаги через фильтр-элемент VA была обнаружена через три минуты после начала распыла воды. На *рис. 3.45а* отчетливо видно, что вода интенсивно проникает на чистую сторону образца не сквозь фильтровальный материал, а через прокладку на его стыке с рамкой фильтра. Это говорит о недостатках в технологическом процессе сборки панельных фильтров у производителя.

В отличие от фильтра VA, протечек воды через образец М2 в течение 15-минутного теста зафиксировано не было. Тактильный контроль чистой стороны фильтр-элемента показал отсутствие следов влаги (*рис. 3.45б*), что говорит о правильном выборе фильтровального материала и качественной сборке панельного коагулятора.



а)



б)

Рис. 3.45. Панельные фильтры: а) образец VA, течь воды; б) образец M2, течи воды нет

Компания FAIST AIS в своих технических информационных письмах рекомендует для повышения эффективности работы первой и промежуточной ступени фильтрации КВОУ 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. Один из фильтров был изготовлен по новой технологии DS, другой имел прогрессивную трехслойную структуру нетканого материала, который увеличивает свою плотность к стороне чистого воздуха. Фильтр-элементы, изготовленные по такой технологии, хорошо себя зарекомендовали в процессе эксплуатации и как фильтры промежуточной ступени очистки циклового воздуха ГТУ, и как коагуляторы.

Для сравнительных испытаний был взят образец нового фильтра FFT немецкой компании (рис. 3.46а) и изготовленный по технологии DS образец FA (Нидерланды). Эти фильтры тестировались, как и другие образцы, при расходе воздуха 3400 м³/ч и подаче воды через форсунки 2 л/мин.

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 внешнего осмотра. Как хорошо видно на рис. 3.46б, нижняя часть всех карманов фильтра мокрая, что говорит о невысокой гидрофобности фильтровального материала.

Образец FA проработал 18 месяцев на ТЭЦ Mantova в Италии, где обеспечивал очистку циклового воздуха ГТУ АЕ94. В районе этой ТЭЦ находится множество тополей, которые в период цветения образуют большое количество тополиного пуха, поступающего в фильтры КВОУ (рис. 3.47а).



а)

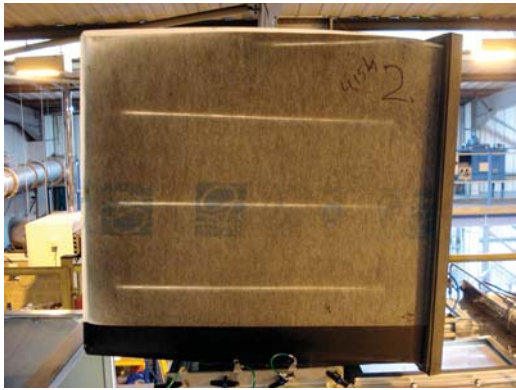


б)

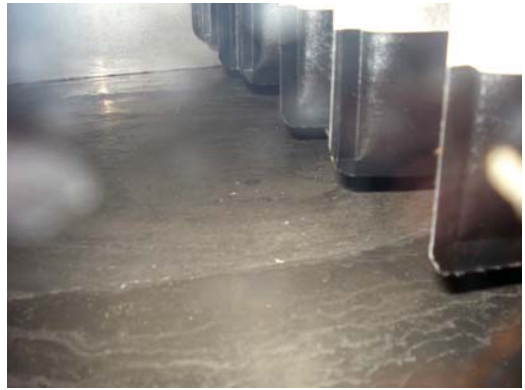
Рис. 3.46. Образец FFT на стенде:

а) перед началом;

б) после окончания теста



а)



б)

Рис. 3.47. Образец FA: а) перед испытаниями; б) после 30 минут испытаний

Такой выбор использованного фильтра для тестирования был неслучаен, поскольку в районе ТЭЦ с ПГУ в Москве также посажено большое количество тополей и в весенне-летний период 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 к влаге фильтровального материала и эффективной системе дренажа. Кроме того, можно отметить, что даже после длительной эксплуатации фильтра FA в условиях повышенной загрязненности воздуха фильтр-элемент, изготовленный по технологии DS, не теряет своих гидрофобных свойств.

В табл. 3.10 представлены результаты тестирования представленных образцов фильтров на водостойкость.

Водостойкость тестированных образцов фильтров

Таблица 3.10

Обозначение образца	E	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 тестирования образцов фильтров можно констатировать:

– наибольшую водостойкость показали образцы карманного фильтра элемента FA, выполненного по технологии Drop-Safe, и панельные фильтры M1, M2;

– фильтровальный материал образца E, судя по результатам испытаний, обладает наихудшими гидрофобными свойствами из всех испытанных фильтров. Кроме того, начальный перепад давления, заявленный производителем, занижен по сравнению с фактическими результатами тестирования на 88,6 %, что впоследствии приведет к снижению выработки электроэнергии ГТУ;

– производителю образца VA следует улучшить технологию сборки панельных фильтров, обратив особое внимание на герметизацию стыков фильтровального материала с рамкой фильтра;

– при выборе фильтровальных материалов для изготовления фильтров-коагуляторов производителям 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 площади такого фильтровального материала, следовательно,

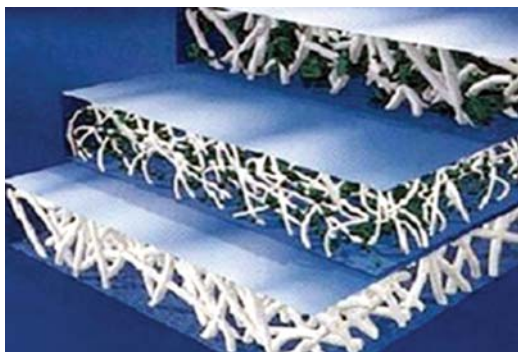


Рис. 3.48. Поперечное сечение фильтрующего материала с прогрессивной структурой

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, чтобы улавливать более мелкие частицы. На рис. 3.48 показано поперечное сечение фильт-

рующего материала с прогрессивной структурой, который используется для изготовления фильтров предварительной очистки [25].

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 улавливаются в первом, менее плотном слое (в крупных ячейках), более мелкие проникают во второй, более плотный (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 с активированной поверхностью, которая образует липкий слой, задерживающий частицы пыли. Средний слой фильтров несет на себе электростатический заряд и притягивает электрически заряженные мелкие частицы. 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.

Этот материал значительно облегчает конструкцию и не ведет к коррозии металла, а следовательно, к появлению искусственного источника загрязнения циклового воздуха ГТУ. Карманы фильтра должны быть сварены в рамку, а не закреплены механически, как это делается в обычных фильтрах. Такая технология обеспечивает полную герметичность фильтров и увеличивает срок службы. Швы карманов спаяны, а не сшиты как у фильтров обычного исполнения. Это придает жесткость конструкции и обеспечивает полную герметичность (*рис. 3.49б*). Мате-



а)



б)

Рис. 3.49. Карманный фильтр: а) держатели карманов; б) карманы спаянные

риал 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 работы (рис. 3.49а). Такая технология изготовления обеспечивает распределение воздуха по всей площади фильтра, чего не может обеспечить конструкция обычных фильтров, где провисающие карманы мешают равномерному поступлению воздуха (см. рис. 3.1).

Если зазор слишком велик (рис. 3.50в), то поступающий поток воздуха раздувает карманы и внешние их стороны прижимаются друг к другу. Воздух перестает проникать в места соприкосновения карманов, и в таком фильтре используется только эта часть карманов, передняя же практически исключена из процесса фильтрации.

Если зазор слишком мал (рис. 3.50б), то воздух не проходит в заднюю часть кармана, а просачивается через переднюю стенку фильтра. В данном случае задняя часть карманов в процессе фильтрации не участвует. И только в фильтре (рис. 3.50а) держится оптимальный зазор, позволяющий потоку воздуха распределяться по всей внутренней поверхности карманов.

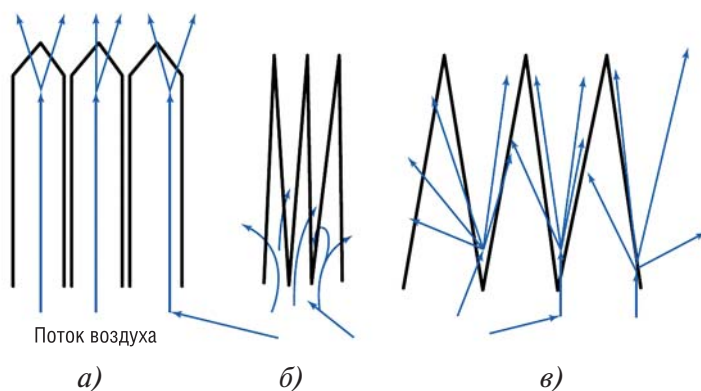


Рис. 3.50. Схема работы карманных фильтров при оптимальном (а), малом (б) и большом (в) зазоре между карманами

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].

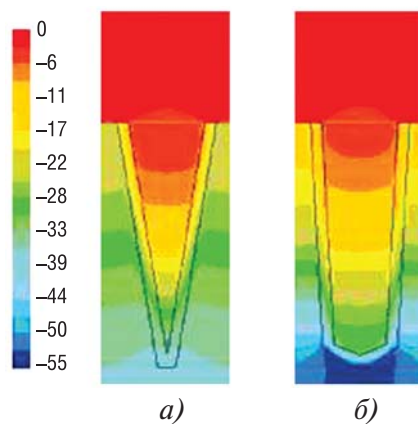


Рис. 3.51. Контурные статического давления кармана: а) V-образной формы; б) деформированного кармана

Для данного условия скорости 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 обеспечения самоподдержания карманов. Осевой размер карманов больших фильтров ряда производителей достигает 600–650 мм.



а)



б)

Рис. 3.52. Фильтры: а) фиксация карманов лентами; б) карманы выступают над рамкой

На рис. 3.52 показан способ 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].

Карманы этого фильтра будут деформированы на высоту возвышения над рамкой фильтра, что приведет к соприкосновению их друг с другом (рис. 3.50) и, как следствие, к росту перепада давления (рис. 3.51).

На рис. 3.53а 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, эффективность очистки циклового воздуха такими фильтрами будет крайне низка, а перепад давления на них высок.

На рис. 3.53б видны места слипания карманов, через которые грязный воздух не поступал, поэтому они отличаются по цвету от другой части фильтровального материала. Отсюда можно сделать вывод, что предложенный способ обеспечения самоподдержки карманов фильтров больших размеров не обеспечивает необходимой надежности в системах фильтрации КВОУ ГТУ.

Другой ошибкой производителя фильтров немецкой компании Е являются карманы, не соответствующие размерам рамки КВОУ, в которую

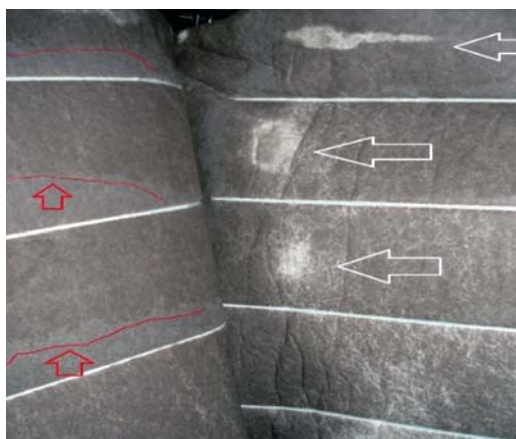
они устанавливаются. На *рис. 3.54* изображены фильтры, карманы которых имеют увеличенные размеры в радиальном направлении. В результате этого карманы вышестоящих в КВОУ фильтров накладываются на карманы нижестоящих [26].

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 непрохождении через них загрязненного атмосферного воздуха и неучастии в процессе фильтрации. Безусловно, реальная эффективность и пылеемкость таких карманных фильтров ниже указанной в паспортах фильтр-элементов их производителем немецкой компанией 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 являются 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, хо-



а)



б)

Рис. 3.53. Карманные фильтры: а) с оторванными фиксирующими лентами; б) места слипания карманов



Рис. 3.54. Неравномерное распределение пыли по карманам фильтра компании E



Рис. 3.55. Смятые карманные фильтры на верхнем ряду КВОУ ГТУ



а)



б)

Рис. 3.56. Карманный фильтр зимой: а) блокирование карманного фильтра снегом; б) количество снега, удаленного из фильтра

рошо 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, а 300 мм. Или провести перетрасировку электрических кабелей системы освещения.

В зимних условиях эксплуатации КВОУ ГТУ наблюдается забивание (блокировка) длинных карманов фильтров снегом (рис. 3.56). Через заблокированные снегом фильтры расход воздуха резко снижается, растет перепад давления на них, рабочая точка компрессора приближается к границе помпажа, снижается КПД энергетической установки и выработка электроэнергии [26].

При сильном снегопаде и неэффективной работе антиобледенительной системы КВОУ возможно вынужденное (не санкционированное системным оператором) снижение нагрузки ГТУ и энергоблока, 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 воздействием возникшей силы места стыка фильтровального материала с рамкой фильтров рвутся (рис 3.57а).

При эксплуатации воздушных фильтров в зимних условиях при знакопеременных температурах ок-



а)



б)

Рис. 3.57. Повреждение карманов фильтра: а) под тяжестью снега; б) льдом

ружающей среды снег, отложившийся в карманах, 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 снеговой нагрузки. Попытки укрепить рамки фильтров компании E с помощью саморезов не приводят к желаемому результату (рис. 3.58а).

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 немецкая компания FFT – запрессовка металлического уголка из не-



а)



б)

Рис. 3.58. Укрепление рамки карманного фильтра: а) компании E саморезами; б) компании FFT запрессовкой металлического уголка

ржавеющей стали в пластмассовую рамку фильтра. В результате полностью выполняется требования стандарта и ГОСТ: **фильтры должны быть устойчивы к возможным механическим воздействиям во время обычной эксплуатации.**

Этого нельзя сказать о фильтрах немецкой компании E. 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 показывает, 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 прикреплена к рамке фильтра ненадежно, в результате чего возникла протечка грязного воздуха на «чистую» сторону фильтра, что хорошо видно на *рис. 3.59а*.



Рис. 3.59. Карманные фильтры компании E: а), б) фильтровальный материал не запаян в рамку фильтра

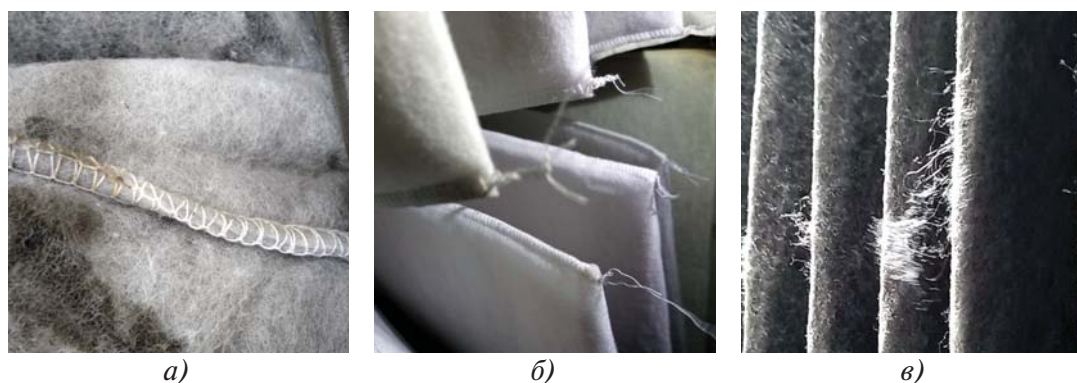


Рис. 3.60. Фильтры компании E: а) прошитые карманы; б) нити прошивки карманов; в) ворс фильтровального материала

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, и вызывают их загрязнение.

Другой проблемой таких фильтров, помимо неравномерного распределения 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].

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.

Во избежание проблем в зимний период эксплуатации карманные фильтры могут устанавливаться в КВОУ не только традиционно (карманами вниз по потоку), но и реверсно, т. е. карманами вверх по потоку. Для поддержания карманов в оптимальном состоянии при их реверсной установке относительно фильтров другой ступени КВОУ немецкая компания FFT предлагает металлическую поддерживающую корзину (*рис. 3.62*) [27]. Безусловно, такая система фиксации карманов имеет свои преимуще-



а)



б)

Рис. 3.61. Ржавые элементы карманного фильтра: а) рамка; б) разделитель карманов



а)



б)

Рис. 3.62. Корзина для реверсного крепления к фильтру: а) кассетному; б) карманному

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. 3.63б) [28].

На рис. 3.64 для сравнения показано состояние карманных фильтров в зимний период эксплуатации при базовой и реверсной установке кар-

ства и недостатки. К положительным факторам следует отнести неизменность положения фильтров, что дает равномерное заполнение всех карманов потоком воздуха. Это обеспечивает проектную эффективность фильтрации, отсутствие деформации карманов, что 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.

Кроме того, чтобы избежать ржавления этих корзин и создания искусственного источника загрязнения фильтров, они должны быть изготовлены из нержавеющей стали или оцинкованного железа, что, безусловно, может привести к удорожанию таких фильтров. Однако при соблюдении всех требований

манных фильтров в КВОУ энергетических установок. Комментарии излишни.

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 Mikrogrog в ноябре 2022 года был протестирован фильтр-элемент, изображенный на рис. 3.49. Испытание 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 трех часов (рис. 3.65).

В процессе тестирования карманного фильтра осуществлялась фото- и видеофиксация результатов испытаний. Протечек воды в процессе тестирования зафиксировано не было. После трех часов теста карманный фильтр был снят с испытательного стенда и визуально осмотрен. 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, запаянными в рамку фильтра фильтровальным материалом показала 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.

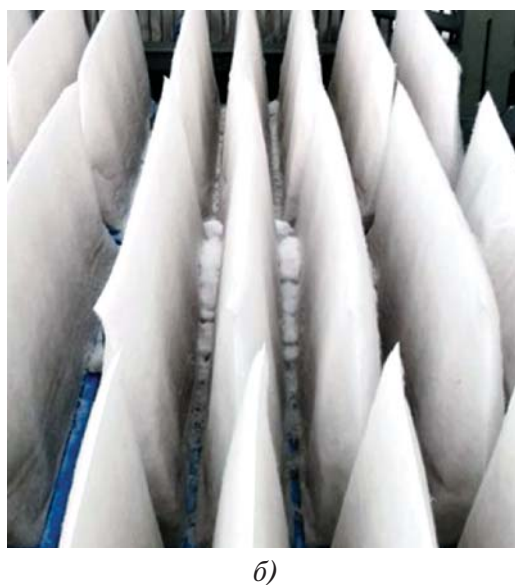
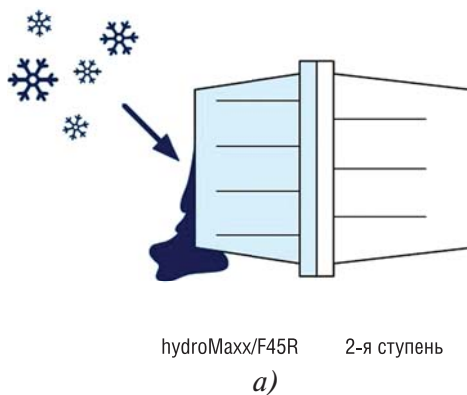


Рис. 3.63. Реверсная установка карманного фильтра:
а) на схеме; б) в КВОУ ГТУ



а)

б)

Рис. 3.64. Установка карманных фильтров: а) базовая; б) реверсная

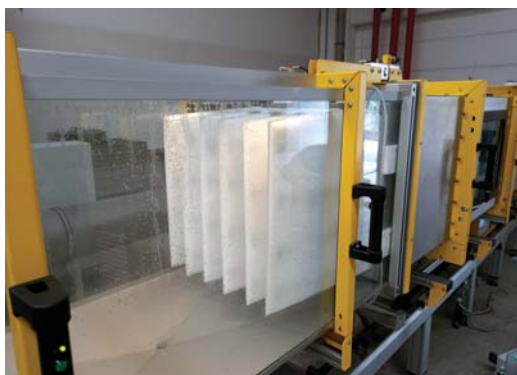


Рис. 3.65. Тестирование карманного фильтра на стенде компании Mikropor

Реверсная установка карманных фильтров целесообразна в КВОУ энергетических ГТУ, имеющих антиобледенительную систему в виде подачи 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 КВОУ ГТЭ-160 Калининградской ТЭЦ-2 двухступенчатую систему фильтрации GDS (*рис. 3.66*) [29].

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.



Рис. 3.66. Система фильтрации компании Donaldson (США)

По заявлению производителя, конусная форма фильтр-элементов лучше, чем прямоугольная, поскольку позволяет увеличить поверхность фильтрующего материала, а следовательно, пылеемкость фильтра при сохранении компактности. Утверждение, что круглые фильтры с материалом Spider-Web с аэродинамической точки зрения лучше прямоугольных с микроскладками, является спорным. Это объясняется тем, что открытая часть складки на выходящей стороне круглого фильтра значительно меньше, чем на входящей. Следствием являются относительно высокие потери давления на выходе складки, что существенно поднимает 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 фильтры 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 времени. Существует вероятность, что накопленная

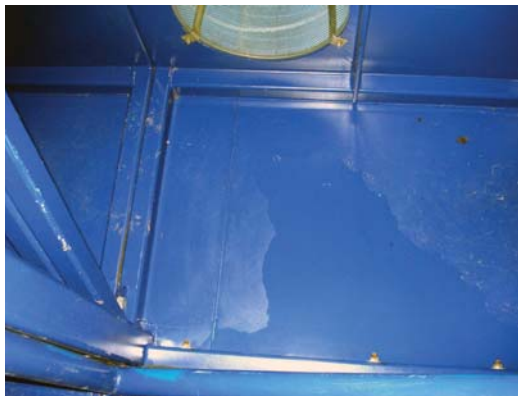


Рис. 3.67. Влага на чистой стороне КВОУ за фильтрами

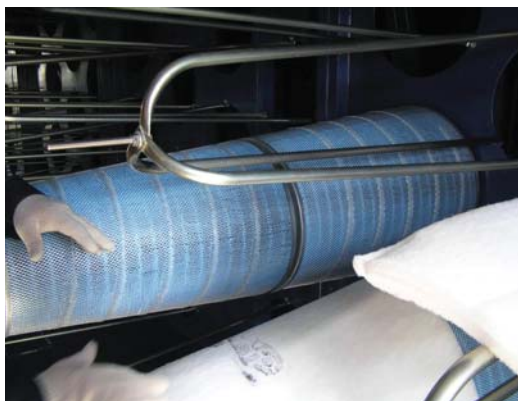


Рис. 3.68. Установка «фильтра-чулка» на конусные фильтры

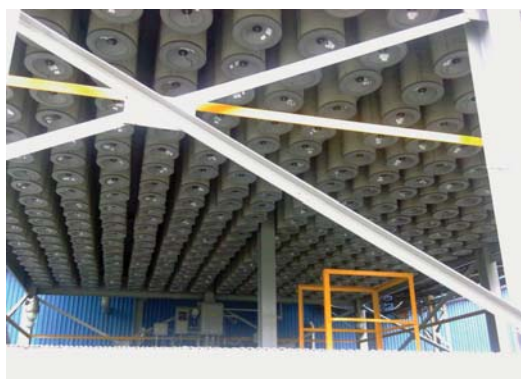


Рис. 3.69. Картриджный фильтр компании FFT (clck.ru/33hwU2)

влага будет проникать в конусные фильтры и там аккумулироваться, вызывая рост давления на фильтро-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.

Осевые размеры фильтров (порядка 1,44 м) поставили под сомнение утверждение производителей о легкой замене «фильтров-чулков» большого конуса при работающей ГТУ (*рис. 3.68*). Если учесть, что эту процедуру необходимо проводить для фильтров верхнего ряда на высоте более 2,2 м без специальных приспособлений, эта задача выглядит трудновыполнимой.

В соответствии с инструкцией по эксплуатации производителя замена ФГО должна проводиться, когда пыль проникает до задней части «фильтра-чулка», достигнув его изнанки, которая в этом случае темнеет. Рекомендуется раз в месяц состояние ФГО проверять визуально. 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



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

конструктивное решение значительно усложняет процесс контроля ФГО и увеличивает время и трудоемкость технического обслуживания системы фильтрации воздуха ГТУ.

Фильтры картриджного типа отличаются от карманных своей компактностью. Принцип работы статических фильтр-элементов картриджного типа аналогичен работе импульсных фильтров, но без очистки обратным импульсом. В зависимости от области применения они изготавливаются из углеволокна, целлюлозы, полипропилена, синтетических и полиэфирных волокон.

По внешнему виду фильтр-элементы картриджного типа бывают коническими, цилиндрическими, с дном открытого и закрытого типа и другие. Каркасная сетка из пластика или металла придает им жесткость, а сам материал плотно складывают подобно гармошке (рис. 3.69).



Рис. 3.71. Многослойная конструкция фильтра компании Gore [31]



Рис. 3.72. Цилиндрические фильтры компании Gore в КБОУ ГТУ (clck.ru/33j5fuG)

Промышленные картриджные фильтры очистки воздуха делятся на фильтры грубой, тонкой и высокоэффективной очистки.

Картриджные фильтры успешно эксплуатируются в районах как с умеренным климатом, так и с низкими температурами (рис. 3.70).

Американская компания Gore (G) для своих цилиндрических фильтров применяет запатентованную многослойную конструкцию, обеспечивающую фильтрацию воздуха класса E12 (T12, рис. 3.71).

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].

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 и к остальным фильтрам общего назначения, предъявляется требование «выдерживать механические напряжения, которые могут возникать при нормальном использовании». Однако ни в одном из проанализированных в первой главе стандартов нет критерия (требования) величины 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 29461-1-2020 этого критерия также нет. В западном стандарте это требование планируется к рассмотрению в ISO 29461-3. Однако для газотурбинных технологий этот критерий является одним из основополагающих и нужен сейчас, а не через



а)



б)

Рис. 3.73. Массовое разрушение фильтров: а) в КВОУ; б) у глушителей шума

несколько лет. Поэтому западные производители ВЗТ для энергетических ГТУ сами начали устанавливать требования для воздушных фильтров, используемых в их КВОУ.

Так, немецкая компания FAIST AIS выпустила несколько Technical Information Letter (TIL) – Технических информационных писем, в которых дала новые рекомендации по выбору фильтров для КВОУ собственного производства. Надеемся, что этот материал будет интересен энергетическим компаниям, использующим 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 касетным 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, приведенных в этом TIL, показано, к чему может привести недостаточное значение давления на разрыв фильтра и ненадежная защитная сетка со стороны выхода воздуха. На рис. 3.73 зафик-



а)



б)

Рис. 3.74. Последствия отрыва защитной сетки на стороне выхода воздуха:
а) разрушения фильтровального материала;
б) выпадение фильтровального материала из рамки фильтра

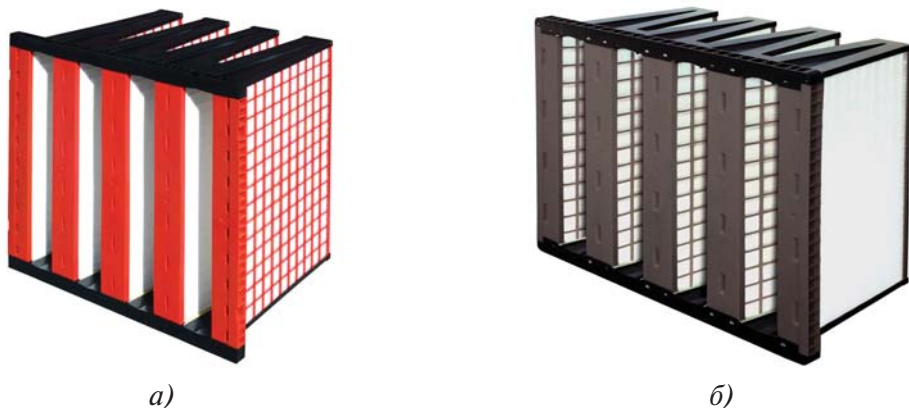


Рис. 3.75. Кассетные фильтры с защитной сеткой:
а) при базовой; б) при реверсной установке

сировано массовое разрушение фильтровального материала ФТО и скопление его перед глушителем шума КВОУ. Можно предположить, что часть этого фильтровального материала вместе с воздушным потоком попала в воздухопровод 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 выхода воздуха. На приведенных рисунках легко узнаваемы фильтры компании E.

Исходя из этого, компания FAIST AIS рекомендует: компактные кассетные фильтр-элементы **должны иметь жесткие и хорошо закрепленные пластмассовые решетки, установленные на ВСЕХ V-образных сторонах фильтровального материала вниз по потоку** (со стороны выхода воздуха на «чистой» стороне).

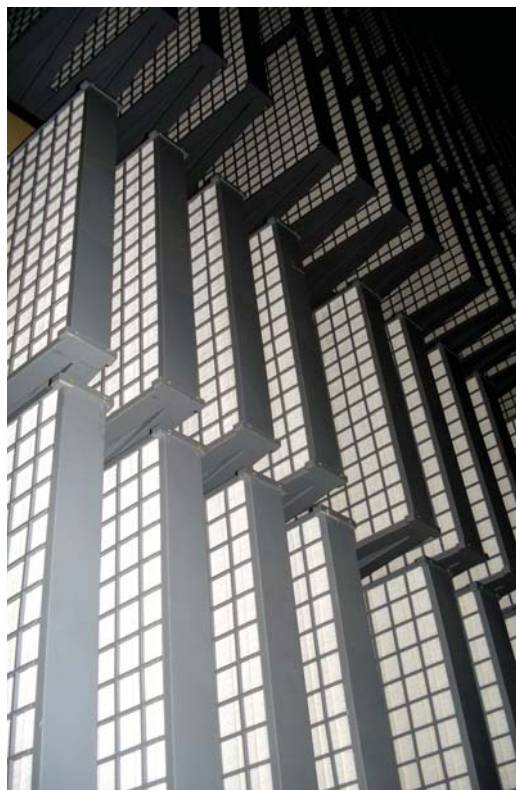
На рис. 3.75а представлен вид ФТО с пластмассовой защитной сеткой, покрывающей фильтровальный материал с «чистой» стороны при базовой установке фильтра в КВОУ. При реверсной установке ФТО защитная сетка устанавливается внутри V-образных карманов (рис. 3.75б). Встроенный дренажный канал в ФТО предотвращает проникновение влаги на «чистую» сторону воздуха. Для ликвидации протечек грязного воздуха и влаги прокладки на рамках ФТО бесшовные, полиуретановые.

На рис. 3.76 показаны кассетные фильтры компании Mikropor при базовой установке в КВОУ энергетической ГТУ и при реверсной установке. Отчетливо видно, что они полностью соответствуют рекомендациям производителя ВЗТ для энергетических ГТУ.

Компания FAIST AIS рекомендует [34] вертикальные складки из микростекловолоконного фильтровального материала, которые обеспечивают

лучший дренаж атмосферной влаги. В соответствии с рекомендацией FAIST AIS фильтры тонкой очистки должны тестироваться 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 заливной воды оказывает значительное гидростатическое давление на донную часть V-образной секции фильтра. Таким образом, задачей теста является подтверждение не только водостойкости, но и общей целостности конструкции фильтра. Поскольку тесты на водостойкость и на разрыв фильтра взаимосвязаны, 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 стано-



а)



б)

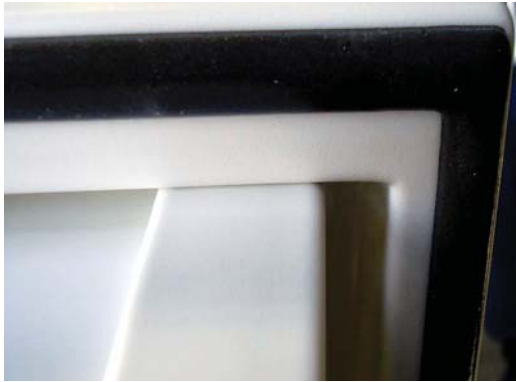
Рис. 3.76. Кассетные фильтры компании Mikropor с защитной сеткой: а) при базовой; б) при реверсной установке

вятся 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 прохождения этого теста является **требование выдерживать назначенное давление во влажном состоянии**. Фильтровальный материал, изготовленный из целлюлозы или бумаги, после намокания такое давление выдержать не сможет.

Таким образом в этих ТП 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 фильтроэлементов 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.

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 определять твердость пластмассовых корпусов воздушных фильтров тонкой очистки с помощью твердомера (дюрометра) по Шору тип D, а при помощи дюрометра типа А оценивать твердость мягких пластмасс и резиновых изделий (например, прокладок фильтров). Эта проверка позволит определить соответствие технических характеристик установленных на фильтрах прокладок.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

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

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, е*).

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*).

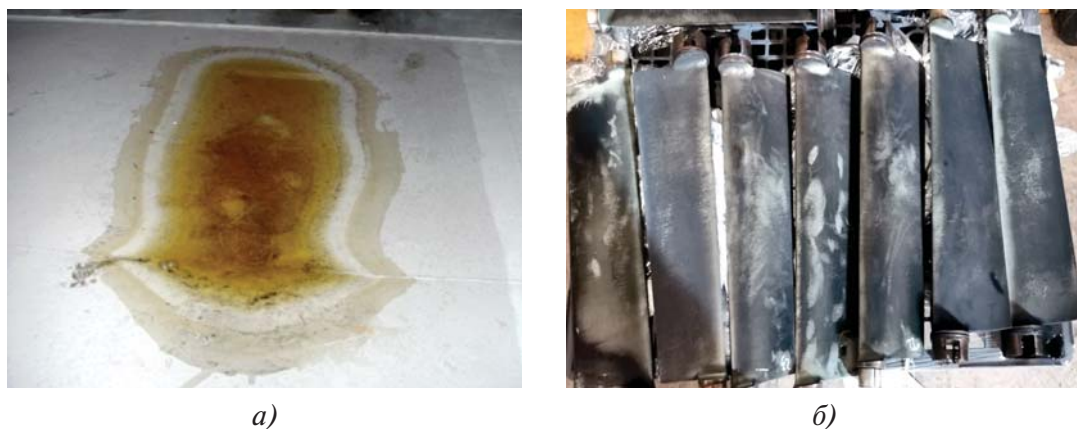


Рис. 3.78. Визуальная оценка эффективности кассетных фильтров компании E:
а) маслянистые пятна в КВОУ;
б) состояние лопаток осевого компрессора ГТУ после снятия

Требования действующих стандартов и ГОСТ гласят, что конструкцией фильтра должна быть обеспечена его плотная посадка в воздуховоде, исключающая утечки по контуру герметизации при соблюдении порядка монтажа.

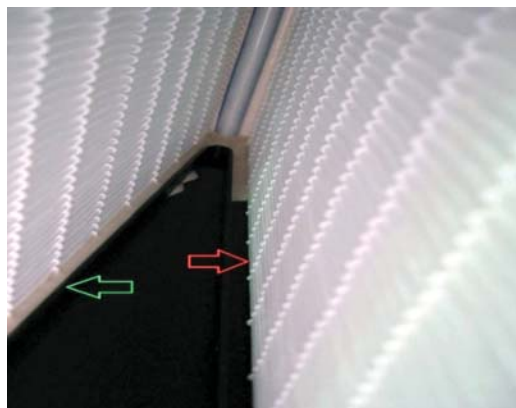
После таких результатов эксплуатации уплотнительных прокладок на кассетных фильтрах немецкой компании E следует правомерный вопрос: кто может дать гарантию соответствия этих фильтров заявленной в их паспортах эффективности? Ответ очевиден — никто. Эти фильтры не отвечают требованиям ни западных стандартов, ни отечественных 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 кас-

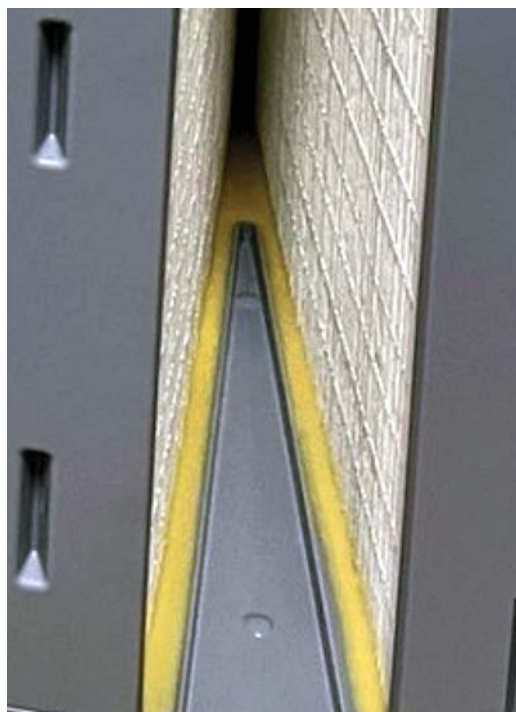
сетном фильтре компании Ф. С одной стороны V-образного канала фильтра герметизация выполнена (зеленая стрелка), а с другой стороны ее нет (красная стрелка). Очевидно, что при такой технологической дисциплине изготовления воздушных фильтров говорить об их качестве и эффективности не имеет смысла. Налицо 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.

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.

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



а)



б)

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



а)



б)

Рис. 3.80. Герметизация стыков фильтровального материала с рамкой кассетного фильтра: а) компании М; б) компании Е.

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, что повреждение фильтровального материала промежуточного кассетного фильтра не несет глобальных последствий для ГТУ, не является корректным. Поврежденный фильтровальный материал фильтра промежуточной очистки под воздействием 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 или пластмассовой решеткой?

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 тол-



Рис. 3.81. Реверсная установка ФТО F8 защитная сетка отсутствует:
 а) перед установкой в КВОУ;
 б) в процессе эксплуатации повреждение фильтровального материала

щину нитей и размеры ячеек. При всех этих отличиях они имеют одну и ту же проблему, обусловленную недостаточной фиксацией защитной сетки с корпусом фильтра.

На рис. 3.82б, в представлены кассетные фильтры тонкой очистки отечественной компании Ф, обнаруженные в КВОУ, с поврежденной защитной сеткой, концы которой вышли из корпуса ФТО (в), так же, 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 уда-

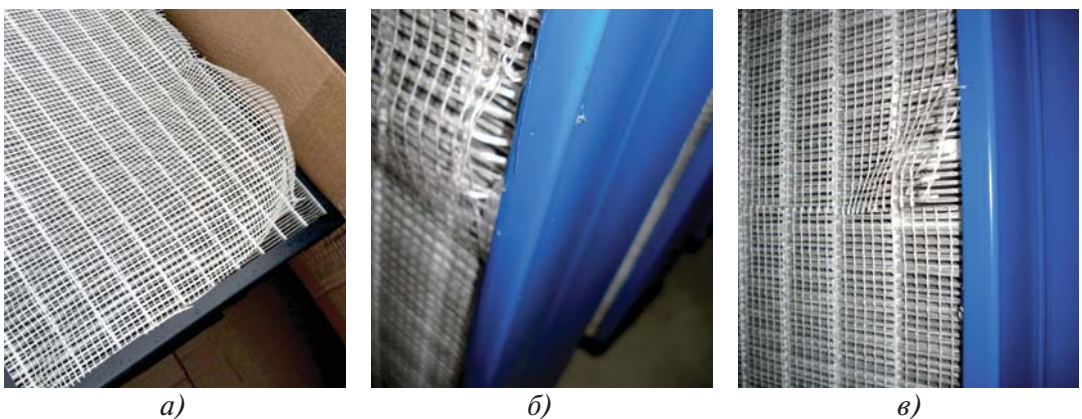


Рис. 3.82. Повреждение синтетические защитной сетки:
 а) отрыв; б) отслоение; в) разрыв

лен 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.

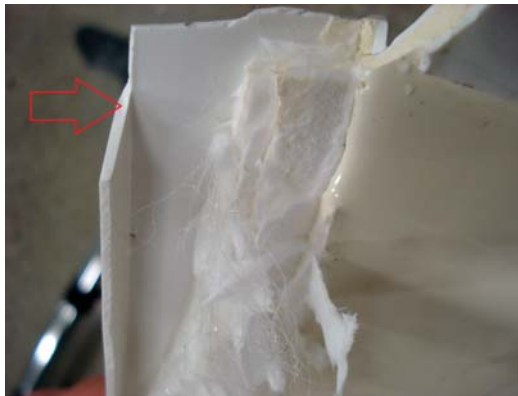


Рис. 3.83. Отсутствие герметика на рамке кассетного фильтра компании E



Рис. 3.84. Ненадежно закрепленная защитная синтетическая решетка

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.

Эти факты говорят, что синтетическая решетка данного производителя фильтров не имеет надежной системы крепления и герметизации.

Для выяснения причин недостаточной фиксации защитных сеток из синтетического материала были претарированы кассетные фильтры разных производителей. На рис. 3.83 показан вскрытый стык фильтровального материала и рамки фильтра тонкой очистки немецкой компании E.

Как видно, технология крепления синтетической защитной сетки этого ФТО сводится к ее подгибанию в рамку фильтра и фиксации герметиком. Однако очевидно — герметик на внутренней стороне рамки фильтра отсутствует, что создает предпосылки отслоения защитной сетки. Кроме того, 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,

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 проверять целостность уплотнений и защиты фильтровального материала ФТО не только во время входного контроля, но и со стороны чистого воздуха КВОУ при каждом останове ГТУ. В процессе эксплуатации фильтров ненадежно закрепленные защитные сетки (решетки) под воздействием вибрации оборудования и силы воздушного потока выпадают из мест 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* показано направление воздушного потока в фильтрах с горизонтальной (*a*) и вертикальной (*b*) укладкой плиссированного фильтровального материала. Аэрозоли, находящиеся во взвешенном состоянии в поступающем 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.

На рынке воздушных фильтров образовались две группы производителей: одна, наиболее массовая – это ярые сторонники горизонтальной укладки фильтровального материала, другая, менее многочисленная –

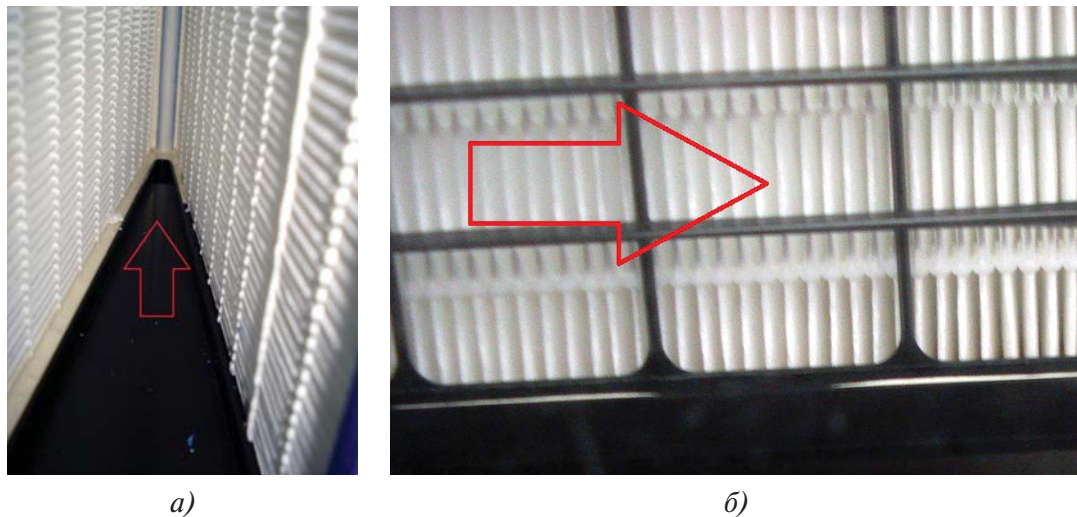


Рис. 3.85. Укладка фильтровального материала: а) горизонтальная; б) вертикальная

представители вертикальной укладки. Нельзя не отметить и еще одну, небольшую, но очень гибкую группу компаний, производящих воздушные фильтры с обоими способами укладки фильтровального материала.

Сторонники обеих больших групп производителей приводят резонные аргументы в обоснование 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° (рис. 3.85б). В результате этого начальный перепад давления на фильтрах с горизонтальной укладкой фильтровального материала при прочих равных условиях ниже, чем на фильтрах с вертикальной укладкой. Другим аргументом этих поставщиков является то, что удалять влагу на входе в КВОУ должны фильтры-коагуляторы, 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 на 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 *табл. 3.11*.

Технические характеристики фильтров тонкой очистки

Таблица 3.11

Параметры образца фильтра	№ 1	№ 2
Класс очистки	F9	
Размеры, мм	590×590×400	592×592×292
Площадь фильтрации, м ²	23	19
Фильтровальный материал	Гидрофобное стекловолокно	
Укладка фильтровального материала	Горизонтальная	Вертикальная
Кол-во V-образных карманов, шт.	3	4
Начальный перепад давления, паспорт/замер, Па	78/85	126/125
Защитная решетка (сетка) на фильтре	Синтетическая	Пластмассовая
Масса 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:

- сравнительной оценке эффективности очистки от механических примесей согласно ГОСТ Р ЕН 779-2014 (EN 779:2012);
- определению водостойкости водяным туманом (распыл воды форсунками);
- выдаче заключения о соответствии технических характеристик фильтров требованиям и рекомендациям производителей ГТУ и КВОУ.

Перед началом стендовых испытаний были выполнены внешний осмотр фильтров, проверка габаритных размеров мерительным инструментом и взвешивание 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 проверки 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.

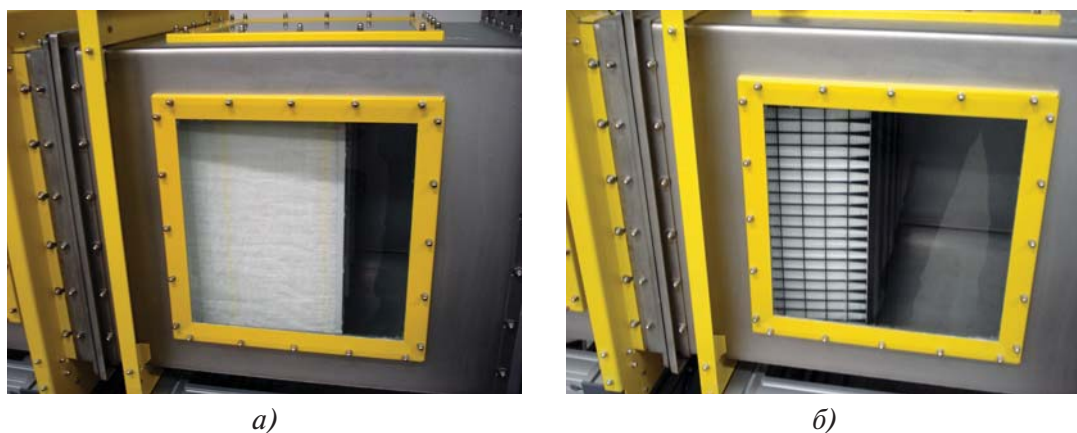


Рис. 3.86. Кассетные фильтры на стенде по определению эффективности: а) образец № 1; б) образец № 2

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 Р ЕН 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 пределах ± 3 % значения измеряемой величины.

С учетом сказанного фактический перепад давления на фильтре № 1 на 9 % превышает заявленный производителем уровень. 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 тестирования на эффективность фильтра № 1. Согласно ГОСТ Р ЕН 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.

Результаты теста по определению эффективности образца № 1 **Таблица 3.12**

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	

Результаты теста по определению эффективности образца № 2 **Таблица 3.13**

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	

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.

Разность в минимальной эффективности фильтров составила 14,9 %. Кроме того, следует отметить, что фильтр № 2 полностью удаляет частицы размером 4,47 мкм в отличие от фильтра № 1. Средняя эффективность фильтра № 2 на 12,1 % выше, чем 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.

После определения эффективности обоих воздушных фильтров тонкой очистки была протестирована их водостойкость водяным туманом, образующимся 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.

Вода к форсункам подавалась насосом. Использованная вода дренировалась в две отдельные емкости: в первую отводилась влага на входе в образец (грязная сторона фильтра), во вторую – вода, проникшая

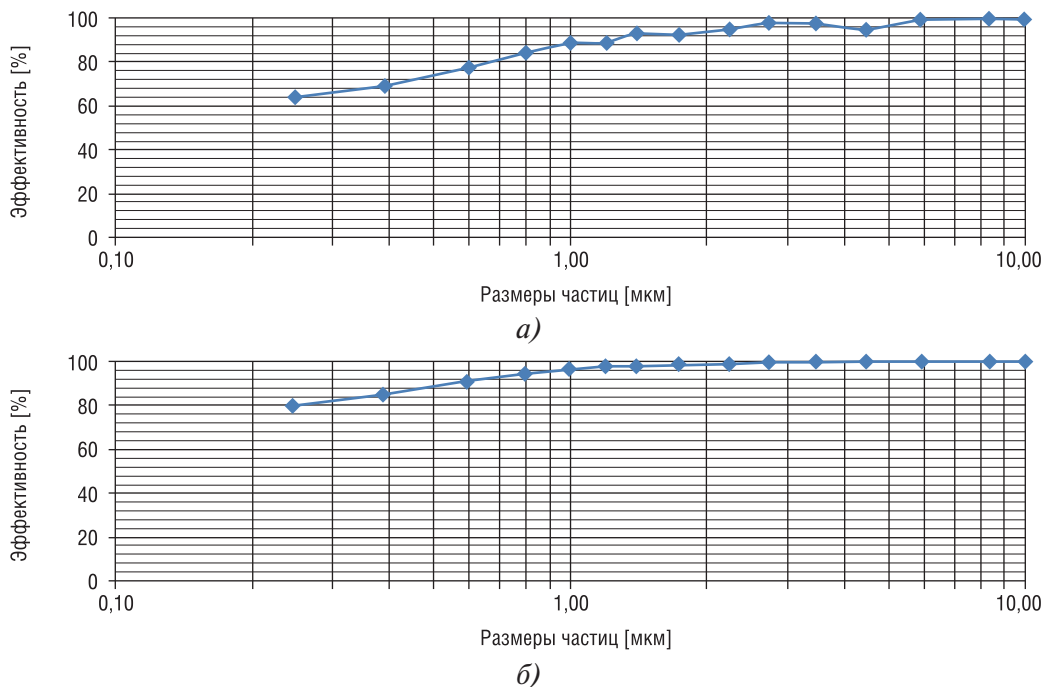
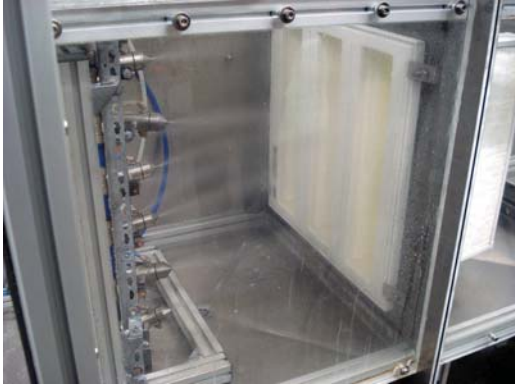
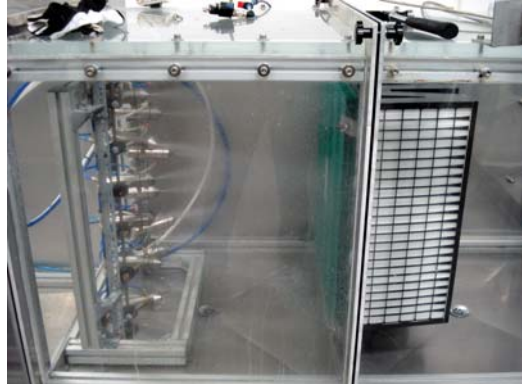


Рис. 3.87. Тренды эффективности: а) фильтр № 1 (с горизонтальной укладкой); б) фильтр № 2 (с вертикальной укладкой)



а)



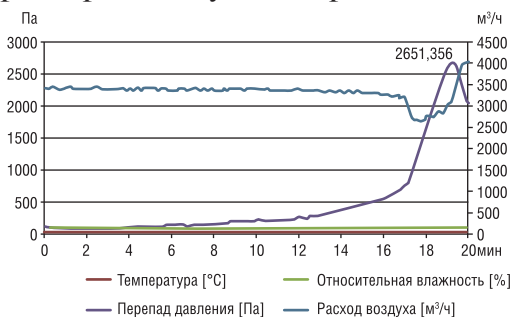
б)

Рис. 3.88. Кассетные фильтры на стенде по определению водостойкости:
а) № 1; б) № 2

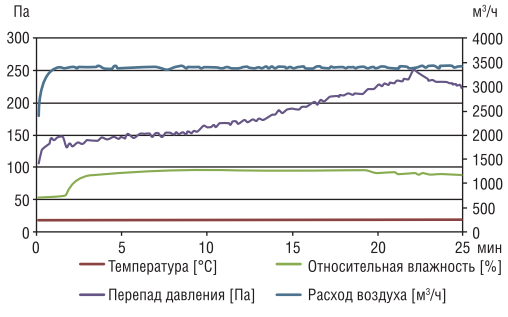
через образец (чистая сторона фильтра). Облицовка испытательного стенда органическим стеклом позволяла визуально контролировать отвод влаги и ее проникновение через фильтровальный материал образца и его стык с рамкой фильтра. Помимо этого, момент протечки воды через фильтр-элемент фиксировался видео- и фотоаппаратурой.

Тестирование образцов фильтров осуществлялось при расходе воздуха 3400 м³/ч. В момент подачи воды к форсункам включался отсчет времени проведения теста. Расход воды через форсунки составлял 1,4 л/мин. Первым тестировался 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)

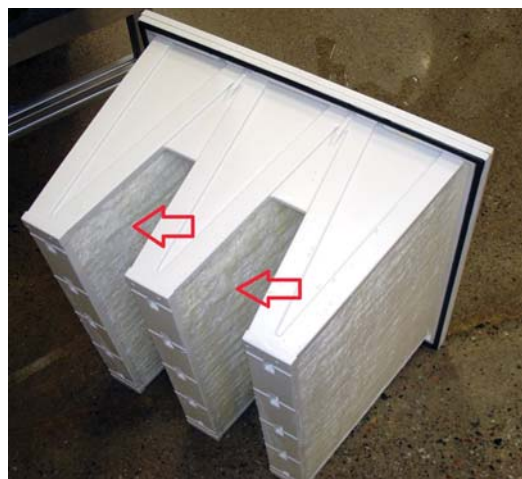
Рис. 3.89. Тренды перепада давления: а) на фильтре № 1; б) на фильтре № 2

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.

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.



а)



б)

Рис. 3.90. Фильтр № 1:

а) протечка воды и прогиб корпуса; б) вздутие защитной сетки

Для выяснения причин различного поведения фильтров во время тестирования на водостойкость было решено их препарировать. 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

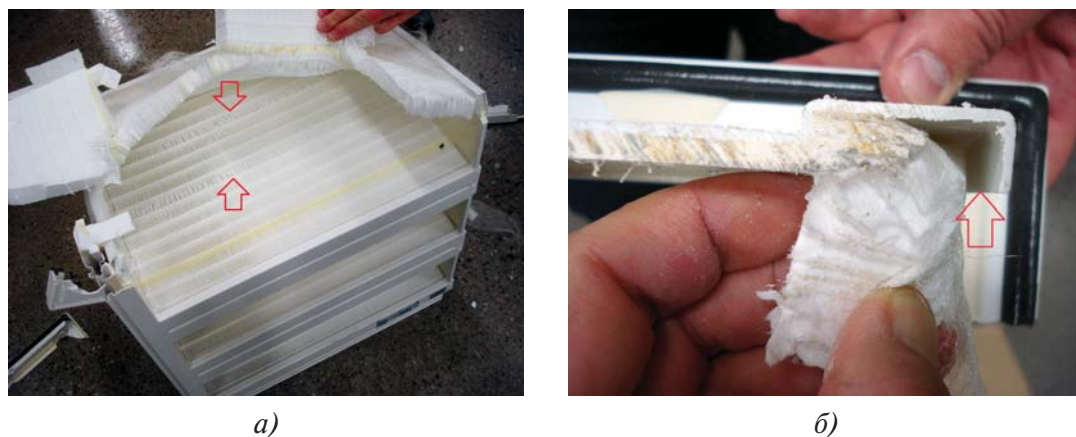


Рис. 3.91. Фильтр № 1 компании E: а) состояние фильтровального материала после теста на водостойкость; б) отсутствие фиксации фильтровального материала и защитной сетки

горизонтально уложенной плиссировкой фильтровального материала нарушено: в одном месте это расстояние увеличено, в другом отсутствует из-за прижатия влагой плиссировки друг к другу. Безусловно, этот факт повлияет на эффективность очистки воздуха от твердых частиц и приведет к снижению класса фильтра.

Эта картина полностью соответствует утверждению производителей фильтров тонкой очистки с вертикальной укладкой фильтровального материала. Влага, поступающая в фильтры с горизонтальной укладкой вместе с потоком воздуха, первоначально скапливается в задней части V-образных секций фильтра, что приводит к деформации плиссированного фильтровального материала. По мере поступления воды деформация 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° 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. 3.91б показано крепление синтетической защитной сетки к рамке фильтра № 1. Отчетливо видно, что в углах корпуса фильтра отсутствует клей (герметик), что снижает прочность фиксации защитной сетки. Кроме того, синтетическая защитная сетка неплотно прилегала



Рис. 3.92. Пластмассовая защитная сетка кассетного фильтра шведской компании С: а) фиксация; б) проверка на прочность

к фильтровальному материалу, образуя гофры (рис. 3.90б), в результате чего фильтровальный материал при набухании водой имеет возможность деформироваться в боковые стороны (разбухать).

На рис. 3.92а представлен срез V-образной секции фильтра № 2. Как видно, 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.

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 эта попытка не увенчалась успехом. Безусловно, 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-turbine softy pes SGTX-(SIL); SGTX-(ANN), Siemens начальный перепад давления на фильтрах тонкой очистки класса 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.

Сравнение технических характеристик фильтров тонкой очистки Таблица 3.14

Параметры	№ 1 (компания Е)	№ 2 (компания С)
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]. Стекловолоконные материалы имеют хорошее соотношение перепада давления и эффективности, однако обладают более низкой механической прочностью по сравнению с синтетическими материалами. Поэтому производителям фильтров для преодоления невысокой степени механической прочности приходится изобретать сложные конструкции. Самым распространенным способом установки стекловолоконного 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 Maxi Pleat немецкой компании FFT используются складки глубиной 250 мм. Конструкция Maxi Pleat обеспечивает особую механическую прочность.

На рис. 3.93 дано схематическое изображение поперечного сечения комплектов Mini Pleat и Maxi Pleat. Скорость потока воздуха, проходящего через фильтр, приводит к перепаду давления, который действует как сила на комплект складок. Сек-

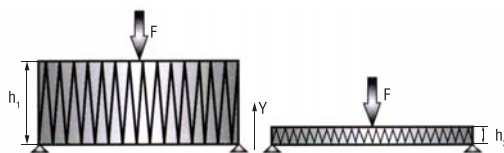


Рис. 3.93. Сравнение Maxi Pleat с Mini Pleat

ционный модуль можно использовать для оценки механической прочности комплекта складок.

Формула секционного модуля для прямоугольного поперечного сечения следующая:

$$W_y = b \cdot h^2 / 6,$$

где b – ширина комплекта складок, h – глубина комплекта складок Maxi Pleat в 6 раз превышает глубину Mini Pleat, секционный модуль оказывается в 36 раз выше.

С учетом этого становится очевидно, что механическая прочность конструкции Maxi Pleat 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 эксплуатации кассетных фильтров Mini Pleat компании E на электростанциях во многих странах мира. Проблемы с кассетными фильтрами с Mini Pleat, вызванные разрывом фильтрующего материала из-за недостаточной механической прочности, были отмечены на электростанциях [2]:

- Bowin (Таиланд). ГТУ GT26, Alstom;
- Bangbo (Таиланд). ГТУ GT26, Alstom;
- Pulau Seraya (Сингапур). ГТУ V94.3A2, Siemens;
- Santa Rita/San Lorenzo (Филиппины). ГТУ V84.3A2, Siemens;
- Glow Suez (Таиланд). ГТУ F6, GE;
- Tri Energy (Таиланд). ГТУ F9FA, GE.

Массовое повреждение кассетных фильтров с Mini Pleat компании E привело к остановке этих электростанций, огромным материальным потерям из-за вынужденного простоя



Рис. 3.94. Массовое разрушение фильтров компании E с Mini Pleat

из-за вынужденного простоя (рис. 3.94). Низкая надежность кассетных фильтров с Mini Pleat, естественно, побудила операторов электростанций и производителей ГТУ 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 Maxi Pleat компании FFT.

Следует заметить, что большинство производителей воздушных фильтров используют плиссированную укладку фильтровального материала Mini Pleat.

Одной из рекомендаций компании FAIST AIS для своих КВОУ 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 подтверждение не только 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*.

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 в виду, что начальный перепад давления на этих фильтрах по понятным причинам выше, чем на фильтрах с горизонтальной укладкой. Поэтому целесообразность применения фильтров с вертикальной укладкой фильтровального материала должна быть обусловлена тяжелыми климатическими условиями окружающей среды (повышенной влажностью), в которой эксплуатируется 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 (как Бангладеш, Малайзия, Индонезия), но и в российских условиях, когда, например, несколько градирен расположены непосредственно рядом с всасом КВОУ ГТУ.

Характеристики испытанных фильтров

Таблица 3.15

Обозначение образца	Класс очистки	Размеры фильтра, мм	Укладка плиссированного материала	Тип плиссированного материала	Фильтровальный материал*
А	М6	592×592×440	Вертикальная	Миниплит	Водостойкое микростекло-волокно
С	F9	592×592×292	Вертикальная	Миниплит	Водостойкое микростекло-волокно
Е	F9	592×592×400	Горизонтальная	Миниплит	Гидрофобное микростекло-волокно
FFT1	F7	592×592×292	Вертикальная	Максиплит	Микростекло-волокно с гидрофобным покрытием
FFT2	E10	593×593×420	Вертикальная	Миниплит	Высокопрочная синтетика и микростекло-волокно с гидрофобным покрытием
Ф	F9	592×592×400	Горизонтальная	Миниплит	Микростекло-волокно
М	E10	592×592×440	Вертикальная	Миниплит	Гидрофобное микростекло-волокно

* информация взята из паспортов фильтров и с официальных сайтов производителей

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.

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 изготовлена из пластмассы. Однако заполнить водой секцию фильтра до уровня 350 мм не удалось, поскольку протечка влаги через стык фильтровального материала и корпус фильтра была зафиксирована через 20 секунд после начала подачи воды.

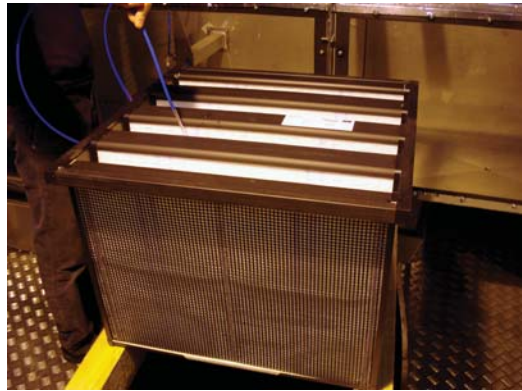
На *рис. 3.96* показаны моменты подачи воды в образец С (*а*) и ее течь из фильтра (*б*).

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 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 (*рис. 3.97*). Этот фактор является основополагающим, поскольку оборудование, культура производства, контроль качества выпускаемой продукции в данном случае идентичны.

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, появилась возможность сравнить по водостойкости две технологии формирования фильтр-элементов фильтрующим материалом, применяемые одним производителем.



а)



б)

*Рис. 3.95. Тестирование образца А:
а) заполнение водой;
б) определение уровня воды*



Рис. 3.96. Тестирование шведского фильтра С: а) подача воды; б) течь воды

Оценку конструкции образца FFT1 дать не представлялось возможным, поскольку он не имеет V-образных секций, корпус фильтра металлический, а не пластмассовый и защитная сетка на чистой стороне воздуха отсутствует. Следовательно, он не может быть использован как конечный (финальный) фильтр тонкой очистки циклового воздуха ГТУ.

Конструктивное исполнение образца фильтра FFT2, по мнению производителя КВОУ, не соответствует его рекомендациям, поскольку пластмассовая решетка на чистой стороне фильтра недостаточно фиксирует фильтровальный материал. При наполнении секции водой образец FFT2 дал течь практически мгновенно с подачей воды через 5 секунд (рис. 3.97в), а образец FFT1 – через 10 секунд. Причем интенсивность протечки была пропорциональна количеству поступающей в секцию воды, 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. При его тестировании V-образная секция была заполнена водой до рекомендуемого уровня 350 мм. Первая капля протечки появилась через 5 минут через уплотнение на стыке фильтровального материала и рамки фильтра (рис. 3.98).

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 E 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 затруднительно. В качестве красителя взяли химически неагрессивную красную гуашь, которая хорошо видна на белом фоне фильтровального материала.

На *рис. 3.99а* зафиксирован уровень подкрашенной воды (45 мм) в V-образной секции образца E, при котором через 26 секунд с начала теста были обнаружены протечки влаги. На *рис. 3.99б* отчетливо видно, что вода протекает не только через стыки фильтровального материала и рамки фильтра, но и через сам фильтровальный материал.

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 собой рыхлую массу волокон, о резистентности которого трудно было судить.

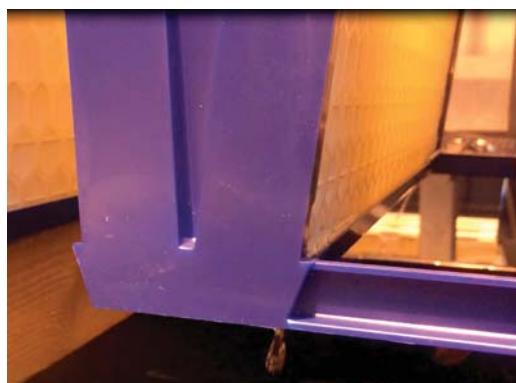
На образце отечественного фильтра Ф процесс появления протечки отличался от предыдущего об-



а)



б)



в)

Рис. 3.97. Тестирование фильтров: а) FFT1; б) FFT2; в) первая капля воды из FFT2

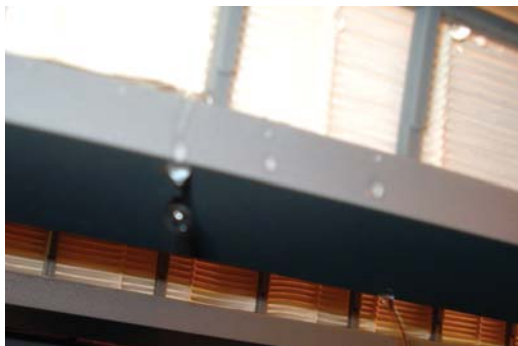


Рис. 3.98. Момент протечки воды из образца М



а)



б)

Рис. 3.99. Тестирование образца Е:
а) уровень подкрашенной воды;
б) течь воды из фильтра

разца. 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 сквозь 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).

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 определения водостойкости протестированных фильтров. Из полученных данных видно, что самые низкие показатели имеют образцы FFT1 и FFT2. Как отмечалось ранее, они не соответствуют рекомендациям производителя КВОУ по нескольким показателям.

Водостойкость тестированных фильтров

Таблица 3.16

Обозначение образца	А	С	Е	FFT1	FFT2	Ф	М
Время до протечки воды, с	20	60	26	10	5	22	300

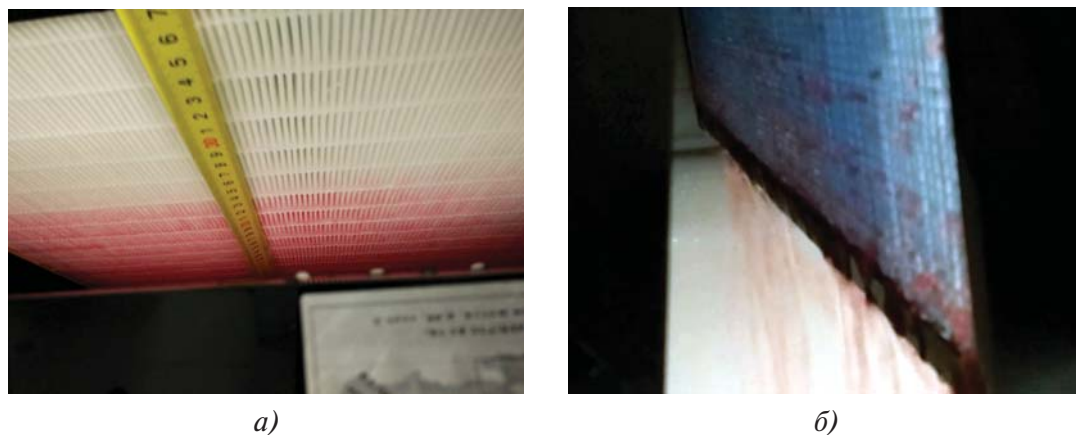


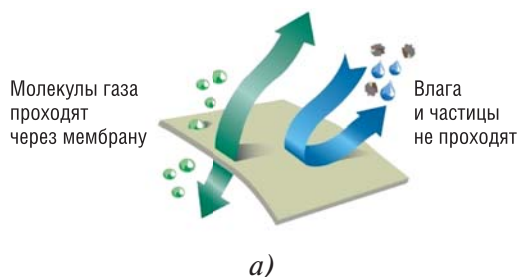
Рис. 3.100. Тестирование образца Φ :
 а) уровень подкрашенной воды; б) течь воды из фильтра

Авторы находятся в постоянном контакте с ведущими компаниями, производящими воздушные фильтры. Производители фильтра FFT2 сообщили нам, что уже усовершенствовали конструкцию 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 герметичности стыков фильтровального материала и рамки фильтра.

Помимо определения водостойкости кассетных фильтров, изготовленных по традиционным технологиям, тестировался кассетный фильтр с запатентованной мембранной технологией (рис. 3.101а) американской компании Gore (G) класса E12 (рис. 3.101б).

Тестирование фильтра G класса E12 продолжалось в течение 30 минут. Ни в процессе испытания, ни после его окончания протечек воды ни через фильтровальный материал, ни через стык фильтровального материала с корпусом рамки зафиксировано не было. 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.



а)



б)

Рис. 3.101. Мембранная технологии компании G:

а) принцип фильтрации (clck.ru/35754V);
б) фильтр E12

Авторы отмечают, что представленные результаты испытаний на водостойкость соответствуют только образцам тестированных 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 выявить проблемы технологии сборки и конструкции фильтр-элементов.

В ближайшие годы планируется ввести в действие новый раздел стандарта ISO 29461-3 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].

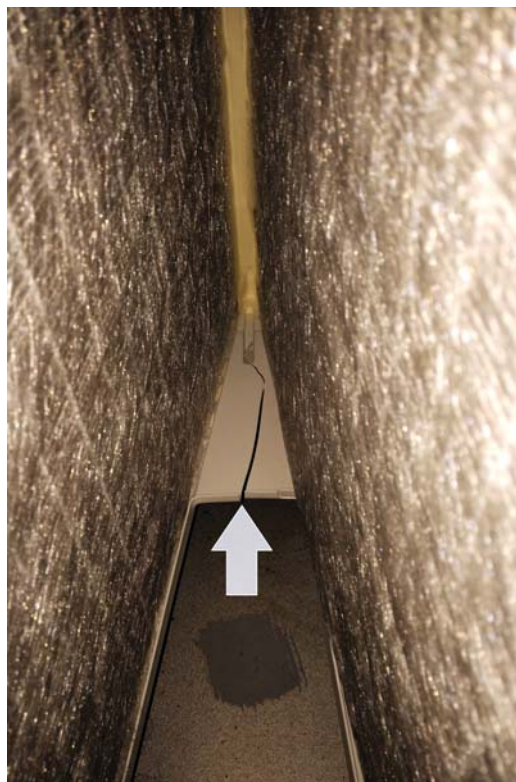
Важным требованием к конструкции фильтров тонкой очистки (ФТО) является наличие прочной пластмассовой рамки (не подвержена коррозии) и защитной сетки (решетки) со стороны выхода воздуха. В случае разрушения фильтровального материала защитная сетка не позволит ему покинуть пределы фильтра и попасть в 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, обнаруженные в КВОУ.

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 выхода воздуха. Разрушение пластмассовых рамок и фильтровального материала фильтр-элементов при работающих ГТУ может привести к попаданию этих предметов в проточную часть. Последствия попадания постороннего предмета в проточную часть осевого компрессора ГТУ представлены на рис. 3.104 [39].

После этих фото в очередной раз становятся очевидными 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 новом стандартах по воздушным фильтрам. Таким образом, производители воздушных фильтров сами определяют величину давления на разрыв.

Посмотрим, какие величины перепада давления на разрыв указывают различные производители в паспортах кассетных воздушных фильтров тонкой очистки. Компания E: ≥ 5000 Па, M: ≥ 6000 Па, Ф: ≥ 7000 Па, С: ≥ 6000 Па. Понятно, что чем выше значение давления на разрыв, тем более надежным может считаться воздуш-



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



Рис. 3.103. Разрушение ФТО компании E



Рис. 3.104. Сломанные лопатки компрессора ГТУ

ный 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 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 с паспортным значением. Тестировались несколько кассетных фильтров тонкой очистки различных производителей.

Методика тестирования [39]

Данный метод 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 «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 через специальный питатель на фильтр подается высококцентрированная эталонная пыль.



Рис. 3.105. Схема испытательной установки тестирования 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 фотофиксацией его состояния. Фильтр тестируется до разрыва (визуальное повреждение) или до достижения 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].

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 с горизонтальной укладкой. Атмосферные аэрозоли, находящиеся во взвешенном состоянии в поступающем в фильтр воздухе, сталкиваясь с поверхностью вертикальной укладки фильтровального материала, коагулируются и под действием силы гравитации

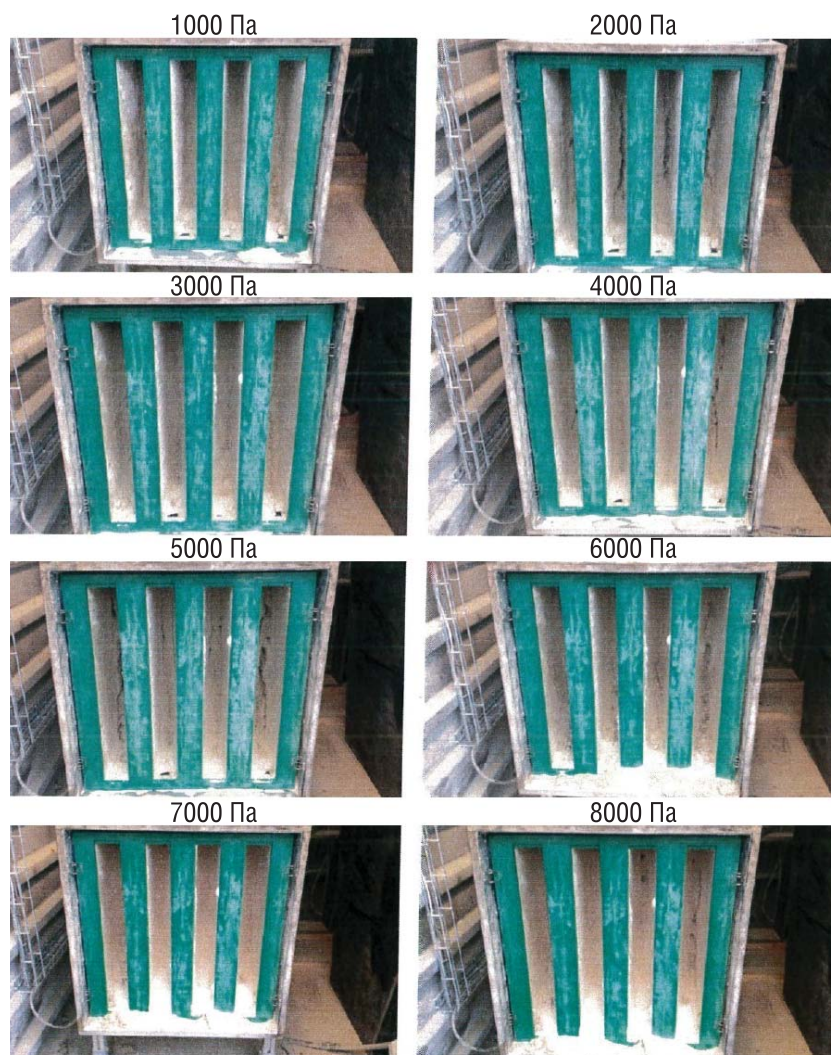


Рис. 3.106. Хронометраж состояния кассетного воздушного фильтра класс F9 шведской компании С в процессе тестирования

Результаты теста фильтра F9 на разрыв

Таблица 3.17

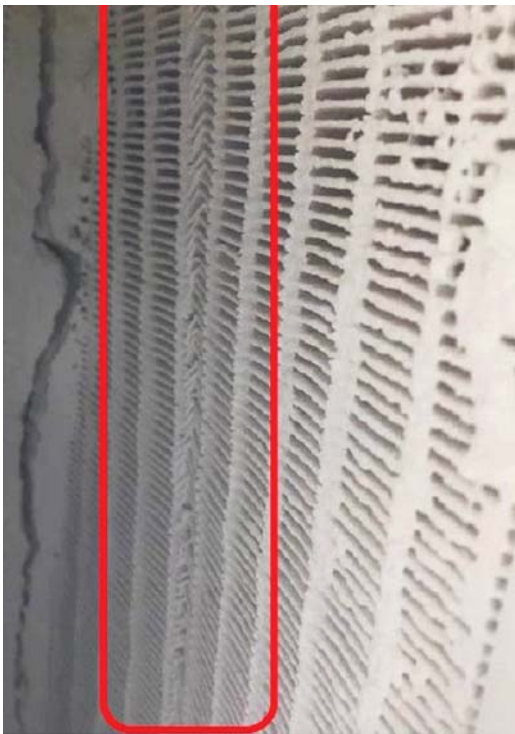
Перепад давления, Па	Результат	Комментарии
1000	Пройдено	
2000	Пройдено	
3000	Пройдено	
4000	Пройдено	
5000	Пройдено	
6000	Пройдено	
7000	Пройдено	
8000	Пройдено	Достигнута максимальная мощность установки

стекают в нижнюю часть фильтра. Поэтому кассетные воздушные фильтры тонкой очистки с вертикальной укладкой фильтровального материала компании С выдерживают давление на разрыв 6250 Па и в смоченном состоянии. Таким образом, указанные в их паспортах значения давления на разрыв соответствуют действительности.

Далее на разрыв тестировались воздушные кассетные фильтры тонкой очистки класса F7 и E11 компании E с горизонтальной укладкой



а)



б)



в)

Рис. 3.107. Хронометраж состояния кассетного фильтра класса F7 компании E в процессе тестирования: а) перед началом тестирования; б) при перепаде давления 2000 Па; в) разрушение фильтровального материала фильтр-элемента при давлении 3500 Па

фильтровального материала. 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 на фото обозначены выявленные проблемные места в конструкции фильтра [39].

Результаты теста ФТО F7 на разрыв

Таблица 3.18

Перепад давления, Па	Результат	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 фильтровальный материал начал деформироваться. При 3000 Па деформация плиссировки 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].

Результаты теста фильтра E11 на разрыв

Таблица 3.19

Перепад давления, Па	Результат	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.

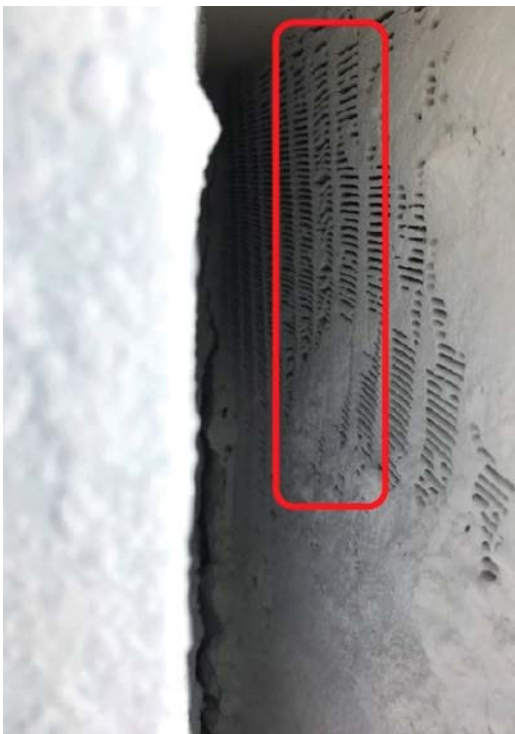
Результаты тестирования кассетных воздушных фильтров компании E различных классов очистки и типоразмеров показали, что фактическое значение давления на разрыв ниже заявленного в их паспортах. Напомним, что согласно программе испытаний на разрыв тестировались сухие

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, аттестованная компанией Siemens AG по-



а)



б)



в)

Рис. 3.108. Хронометраж состояния кассетного фильтра класса E11 компании E в процессе тестирования:

а) перед началом тестирования; б) при перепаде давления 2000 Па; в) разрушение фильтровального материала фильтр-элемента при давлении 4000 Па



Рис. 3.109. Фильтр тонкой очистки компании E во влажном состоянии после испытания на разрыв

ставщик ВЗТ для ГТУ, постоянно контролирует и тестирует воздушные фильтры 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].

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 аналогичного параметра фильтр-элементов с горизонтальной укладкой фильтровального материала и синтетической защитной сеткой.

4. Для климатических условий с повышенной относительной влажностью атмосферного воздуха предпочтительнее 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.

В итоге 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. 3.110*, данный фильтр турецкой компании М имеет прочную пластмассовую рамку и решетку, надежно защищающую материал фильтра.

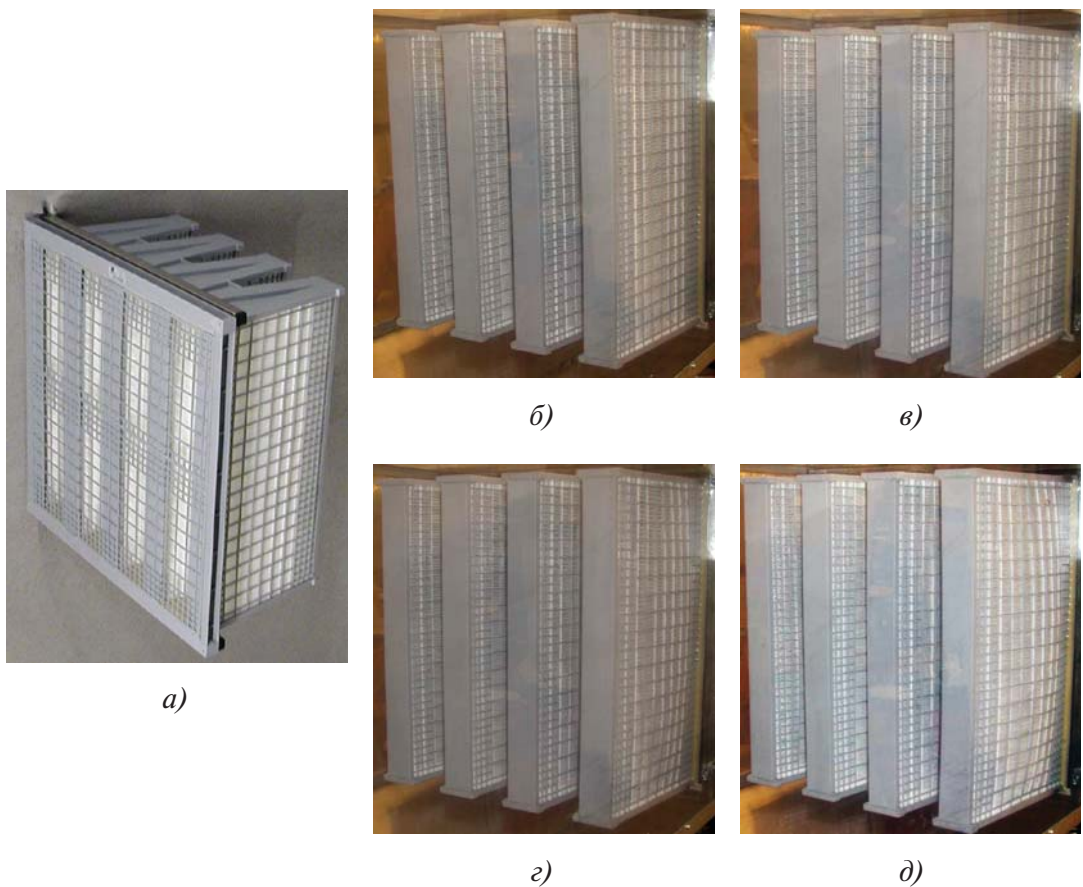


Рис. 3.110. Хронометраж состояния кассетного фильтра класса F7 компании М в процессе тестирования: а) перед началом тестирования; б) при перепаде давления 1500 Па; в) при давлении 3000 Па; г) при давлении 4000 Па; д) при давлении 5160 Па

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 (рис. 3.47).

На рис. 3.111 показаны дренажные канавки ряда производителей кассетных фильтров.

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. 3.111а, б) и турецкой компании М (рис. 3.111д) на грязную сторону воздуха.

Однако кассетный фильтр класса Е11 немецкой компании Е не имел дренажа отвода атмосферной влаги (рис. 3.111е). 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 часть энергетической ГТУ. На рис. 3.111в показана дренажная канавка кассетного фильтра класса F8 компании Е, предназначенного для реверсной установки к финишному фильтру (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. 3.111в, фильтр класса F8 не имеет защитной сетки внутри V-образных секций, что 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 (рис. 3.111в и 3.112б), установленные ре-



а)



б)



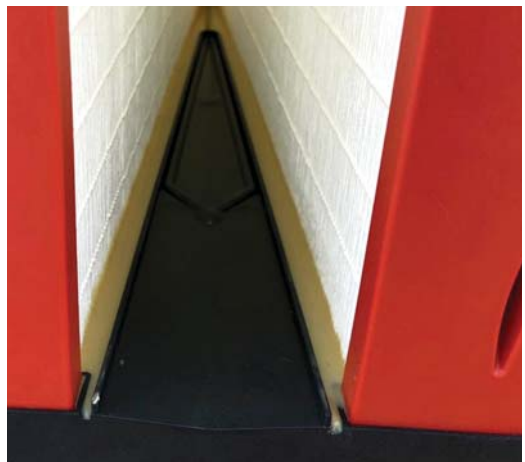
в)



г)



д)



е)

Рис. 3.111. Дренажные устройства кассетных фильтров:
а), б) – шведской компании С; в), г) немецкой компании Е;
д) турецкой компании М; е) немецкой компании FAIST AIS

версно в КВОУ энергетической ГТУ на одной из отечественных 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 E 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, направленным в финишный фильтр, в случае разрыва которого во влажном состоянии (рис. 3.109) его элементы попадут в глушитель шума и двигатель, как это уже было (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 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. В этой главе мы постараемся сформировать требования к системам фильтрации циклового воздуха 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, Европейский комитет в области оборудования для вентиляции и кондиционирования воздуха, предписал указывать на маркировке фильтров не только класс очистки по стандарту EN 779-2012, но и класс их энергоэффективности.

С этой целью все воздушные фильтры западных производителей должны проходить сертификацию компании Eurovent Certification Company (ЕСС). На основании тестирования фильтров этой компанией была выпущена директива Eurovent 4/11-2011[1], согласно которой рейтинг энергоэффективности должны получить все европейские фильтр-элементы с расходом воздуха 3400 м³/ч (0,944 м³/с), размерами 592×592 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, чтобы «продуть» воздух через фильтр-элемент.

Вычисление потребляемой мощности W производится по формуле:

$$W = \frac{q_V \cdot \Delta p \cdot t}{\eta \cdot 1000}$$

где

$q_V = 0,944 \text{ м}^3/\text{с}$ – объемный расход воздушного потока;

$t = 6000 \text{ ч}$ – время работы;

$\eta = 0,5$ – КПД вентилятора;

Δp – падение давления на фильтре.

Падение давления Δp определялось в результате тестирования фильтров 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: $M_F = 100 \text{ г}$.

Величина годового энергопотребления, характеризующая класс энергоэффективности для каждого класса фильтрации, была определена директивой Eurovent 4/11-2011 [1] (табл. 4.1).

Фильтр-элементы с наименьшим энергопотреблением получали класс А, а энергозатратные – класс G. Класс энергоэффективности А выделялся зеленым цветом (зеленые технологии), а низший класс G – красным.

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, состоящие 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

Эффективность воздушных фильтров, (кВт·ч)/год

Таблица 4.1

Класс	G4	M5	M6	F7	F8	F9
ME	–	–	–	≥ 35 %	≥ 55 %	≥ 70 %
	$M_G = 350$ г ASHRAE	$M_M = 250$ г ASHRAE		$M_F = 100$ г ASHRAE		
A	0–600	0–650	0–800	0–1200	0–1600	0–2000
B	>600–700	>650–780	>800–950	>1200–1450	>1600–1950	>2000–2500
C	>700–800	>780–910	>950–1100	>1450–1700	>1950–2300	>2500–3000
D	>800–900	>910–1040	>1100–1250	>1700–1950	>2300–2650	>3000–3500
E	>900–1000	>1040–1170	>1250–1400	>1950–2200	>2650–3000	>3500–4000
F	>1000–1100	>1170–1300	>1400–1550	>2200–2450	>3000–3550	>4000–4500
G	>1100	>1300	>1550	>2450	>3550	>4500

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, 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.

Чтобы оценить значение директивы Eurovent 4/11-2011 для отечественной электроэнергетики, проведем сравнительный анализ энергоэффективности фильтров классов 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 класса 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 элект-

троэнергии 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:

– для фильтров G4: $\Delta E_4 \cdot (N_{ВЛО} + N_{ФГО}) = 86\,267,7$ кВт·ч/год;

– для фильтров F8: $\Delta E_8 \cdot N_{ФТО} = 1\,389\,887$ кВт·ч/год.

Итого для КВОУ с системой фильтрации G4–G4–F8 суммарные потери электроэнергии $\Sigma \Delta E$ составят $1476\,154,7$ кВт·ч, или $1476,16$ 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 $2952,32$ МВт·ч в год. Если оценивать материальные потери большой энергетической компании, вызванные использованием в КВОУ ТЭЦ неэнергоэффективных воздушных фильтров, то эта величина может достигать нескольких десятков миллионов рублей в год. С другой стороны, использование воздушных фильтров с низким энергопотреблением позволит избежать таких 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 решено отказаться. Для сертификации стали обязательными воздушные фильтры классов M5–F9. Были изменены и цвета, характеризующие класс энергоэффективности. Вместе с тем был введен высший класс энергии A+ для наиболее эффективных продуктов. Стало доступно шесть классов энергоэффективности (от A+ до E). Фильтры, прошедшие тестирование компанией ЕСС, должны иметь маркировку, 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).

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 на основе сертифицированных данных, разработанная ЕСС, – это четкое и надежное решение для быстрого определения энергоэффективности продукта.

Где же инженерному персоналу отечественных ТЭЦ получить информацию об энергоэффективности зарубежных воздушных фильтров? Как отмечалось ранее, технические характеристики фильтров должны быть



а)



б)

Рис. 4.1. Этикетка сертификата Eurovent фильтра Mikropor: а) по стандарту EN 779-2012; б) по ISO 16890

представлены в их паспортах, на маркировке коробок, в которых они поступают от поставщика, и на самих фильтрах. Кроме того, на официальном сайте Eurovent Certification Company www.eurovent-certification.com можно найти технические характеристики всех сертифицированных этой компанией фильтров. Среди них продукция 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. Есть 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 из крупнейших мировых производителей воздушных фильтров для ГТУ и вентиляции является турецкая компания Mikropor.

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 энергетических компаний на собственные нужды.

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 с начала XXI века, 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. 2.49a*) 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 опубликовала статью «Комбинированные системы фильтрации воздуха ГТУ компании FAIST» [4] и Technical Infor-

mation Letters (TIL) – Техническое информационное письмо в отечественном журнале «Газотурбинные технологии» о реверсной установке воздушных фильтров в КБОУ [5].

Одной из рекомендаций компании FAIST AIS 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). Такая система крепления фильтров в КБОУ компании FAIST AIS уже длительное время используется для очистки циклового воздуха ГТУ Siemens AG.

Комбинированные системы фильтрации циклового воздуха с реверсным креплением ФТО компании FAIST AIS установлены в КБОУ мощнейшей ГТУ SGT5-8000H на электростанции Lausward в Дюссельдорфе (Германия) на энергоблоке «Фортуна» (рис. 4.3).

Эта электростанция побила три мировых рекорда: в ходе приемочных испытаний была достигнута максимальная электрическая мощность 603,8 МВт, а чистая эффективность преобразования энергии (КПД) составила около 61,5 %. Кроме того, энергоблок «Фортуна» может поставлять до 300 МВт для системы централизованного теплоснабжения Дюссельдорфа.

Ранее, в 2012 году, такая система фильтрации циклового воздуха в КБОУ ГТУ Siemens SGT5-3000E (V94.2A) была применена на химическом предприятии BASF – Ludwigshafen (Германия).

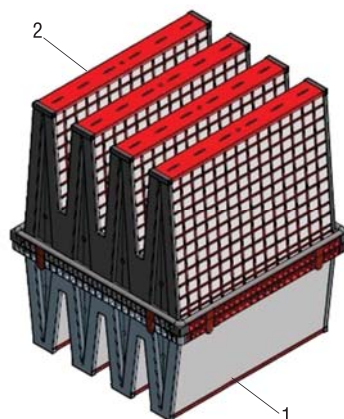


Рис. 4.2. Комбинированная система фильтрации воздуха компании FAIST: 1 – фильтр предварительной очистки; 2 – фильтр финишной очистки

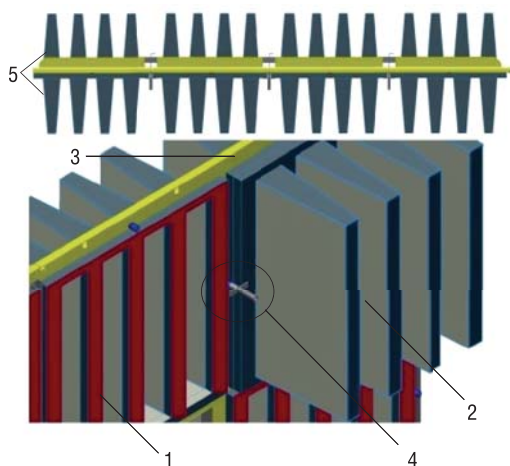


Рис. 4.3. Вид на КБОУ компании FAIST AIS для ГТУ SGT5-8000H энергоблока «Фортуна» электростанции Kraftwerk Lausward в Дюссельдорфе [4]

В конце статьи компания FAIST AIS приводит очередное Техническое информационное письмо (TIL), в котором перечисляет названия объектов и типы ГТУ, на КВОУ которых была применена система фильтрации воздуха с реверсным креплением фильтров компании FAIST AIS, и время установки этих систем. **«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 г. 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 КВОУ 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 Münster, 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 попа», 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, 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.

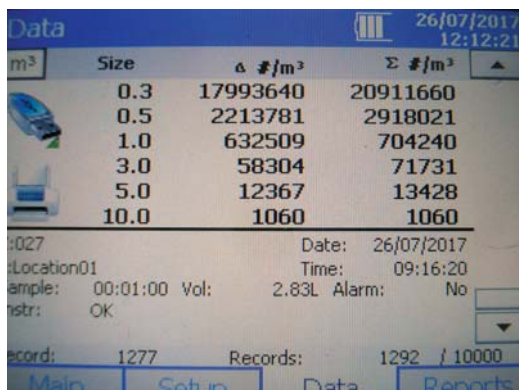
Это поучительный урок всем тем, кто захочет присвоить себе право распоряжаться чужой собственностью, как материальной, так и интеллектуальной.

4.3. Отрицательная эффективность воздушных фильтров

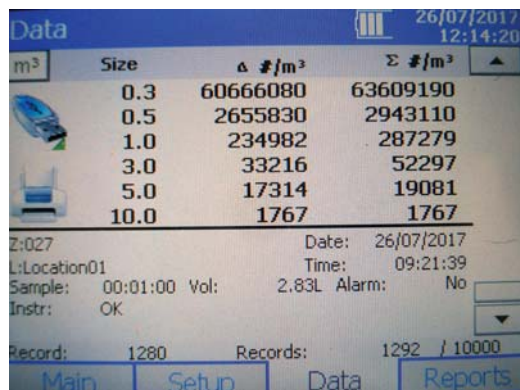
В процессе многолетнего мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на различных объектах отечественной энергетики нами были зафиксированы случаи увеличения количества и концентрации частиц за воздушными фильтрами в системе фильтрации циклового воздуха ГТУ по сравнению со всасом КВОУ. Так, в процессе мониторинга фильтров средней очистки (ФСО) класса М6 на КВОУ ТЭЦ в Перми было установлено увеличение количества частиц размером 0,5–1 мкм в 6 раз за фильтрами по сравнению с количеством на входе в фильтр-элементы [2].

В климатических условиях Москвы за аналогичными фильтрами класса М6 с глубиной карманов 500 мм того же производителя компании Е отмечалось увеличение количества частиц размером 0,3–0,5 мкм в 3,4 раза (рис. 4.4), а концентрация этих частиц в 5 раз по сравнению со всасом КВОУ (рис. 4.5) [6].

Также зафиксировано увеличение количества и концентрации частиц крупной дисперсности 5 и 10 мкм.

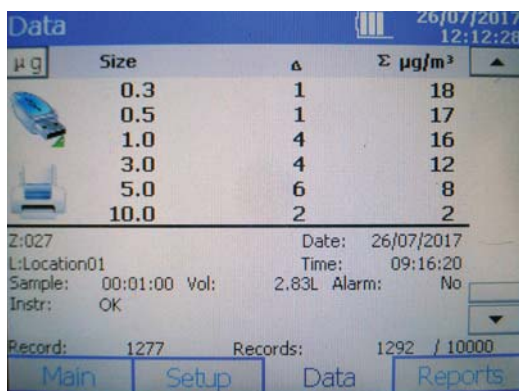


а)

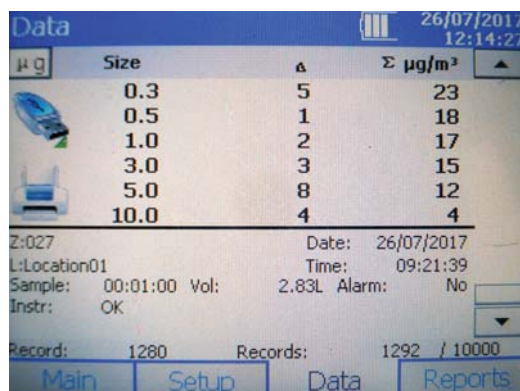


б)

Рис. 4.4. Количество частиц пыли: а) на все КВОУ; б) за ФСО М6



а)



б)

Рис. 4.5. Концентрация частиц пыли: а) на все КВОУ; б) за ФСО М6

Выясним, что говорит по этому поводу российский ГОСТ Р ЕН 779-2014 «Фильтры очистки воздуха общего назначения. Определение технических характеристик», которым еще пользуется большинство энергетических компаний.

Прежде всего вспомним область применения этого документа. Ввиду 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 приобретенных воздушных фильтров 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 приложении А, посвященном 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 содержит способы оценки эффективности для твердых частиц размером более 3 мкм.

Выделение волокон или частиц фильтрующим материалом

Некоторые конструкции фильтров 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 М 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 захваченными частицами пространства для прохода воздуха. 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:

– нормальным воздушным потоком через фильтр при периодическом (например, ежедневном) пуске и останове воздушных кондиционеров на объектах;

– изменениями расхода воздуха, приводящими к сжатию и разрыхлению фильтрующего материала;

– 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 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 пыли 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.

Итак, 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 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 замены фильтров согласно ГОСТ Р ЕН 779:2014 и его европейского аналога является соответствующий перепад 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.

Как бы ни назывался в ГОСТ Р ЕН 779:2014 процесс увеличения количества и концентрации частиц в кубическом метре воздуха за фильтром, по сравнению с этими параметрами на входе физическая сущность его сводится к уменьшению эффективности очистки ниже нуля. Поэтому возьмем на себя смелость назвать это явление *отрицательной эффективностью*.

4.4. Высокоэффективные системы фильтрации воздуха

Концепция применения фильтров НЕРА была разработана более 30 лет назад в США. На электростанции в Фрипорте (Техас) была построена экспериментальная установка, использующая высокоэффективные системы очистки воздуха [11]. В основу программы испытаний была положена идея, 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 достигалось только после механической очистки проточной части компрессора при регулярном техническом обслуживании во время его вскрытия. Испытания опытной установки показали, что система фильтрации класса H11/E11 (с 95 %-ной 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 , 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 XXI века в системы фильтрации ряда энергетических ГТУ входили НЕРА (ЕРА) – фильтры. Они показывали впечатляющие результаты в Великобритании, Голландии, Канаде, Японии, Сингапуре, Филиппинах, Бангладеш и США. Одним из примеров применения таких систем фильтрации являлась ГТУ 701D (Mitsubishi) на металлургическом предприятии в г. 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 три года, фильтра H10/E10 – один год при площади фильтрующего материала 18 кв. м и два года при 31 кв. м. Срок службы фильтра G4 зависел от преобладающих погодных условий.

Другой пример использования НЕРА/ЕРА-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 – 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 г. Хала испытывает сильное негативное влияние сырости и тумана в зимний период. Безусловно, такие погодные условия значительно усложняют и так непростую окружающую среду, в которой эксплуатируется система фильтрации ГТУ.

КВОУ компании Pneumafil (США) для ГТУ расположены на уровне земли (рис. 4.6) [13].

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: предфильтр, промежуточный фильтр и ФТО. КВОУ



Рис. 4.6. Расположение КВОУ ГТУ на электростанции Saltend (Великобритания)

оснащено 640 фильтрующими элементами каждого типа. В зимний период фильтры защищены от обмерзания антиобледенительной системой (АОС), которая начинает работать при температуре ниже +5 °С 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, промежуточные фильтры класса очистки F9 и фильтры тонкой очистки класса H12/E12.

Несмотря на тяжелые условия эксплуатации ГТУ, обусловленные большим количеством источников загрязнения в окружающей среде, срок службы НЕРА/ЕРА фильтров достигает двух лет, а промывка компрессоров вообще не требуется. На рис. 4.7а показано состояние компрессорных лопаток ГТУ 701F3 на электростанции Saltend через четыре года эксплуатации при использовании фильтров H12/E12. Для сравнения, на рис. 4.7б дано состояние компрессорных лопаток ГТУ V94.2 на ТЭЦ, расположенной в Санкт-Петербурге, через шесть месяцев эксплуатации с ежемесячными промывками проточной части при использовании финишного ФТО класса очистки F7 [13].

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 значи-



а)



б)

Рис. 4.7. Состояние лопаток компрессора ГТУ при финишном фильтре:
а) E12; б) F7

– 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 по 153,3 МВт и фильтры тонкой очистки F8.

тельные 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 V94.2A для различных систем фильтрации воздуха [14].

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:

- материал НЕРА/ЕРА – приблизительно 0,005 % в месяц;
- стекловолоконный материал F8 – примерно 1 % в месяц при постоянной работе;

Таблица 4.2

Сводная таблица ежегодных затрат (€) на примере V94.2A

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 дополнительное топливо в результате повышения тепловой мощности	Затраты на потерю мощности			
Целлюлозный импульсный	768 489	530 298	194 443	4 965 501	1 936 693	96 000	684 000	9 175 524
Синтетические G4+F8	575 856	397 371	132 457	4 954 768	1 709 525	72 000	684 000	8 464 177
Наилучший доступный импульсный	768 489	530 298	194 443	3 084 039	1 202 867	144 000	684 000	6 608 136
Стекловолоконные G4+F8	575 856	397 371	132 457	2 658 779	917 348	57 600	684 000	5 423 411
Стекловолоконные G4+F9	575 856	397 371	132 457	1 184 561	408 705	63 000	684 000	3 833 496
G4+F8+H10 HEPA	575 856	397 371	132 457	222 807	76 874	126 900	0	1 532 265
G4+F8+H12 HEPA	575 856	397 371	132 457	1724	595	132 300	0	1 240 303
G4+F8+H14 HEPA	575 856	397 371	132 457	30	10	140 400	0	1 246 124

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 с/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 ($\tilde{N} = 100\text{--}150$ кВт с/кг) на 100 кВт, а современных ГТУ – на 450 кВт [15]. Кроме того, лопатки газовых турбин ГТУ с удельной мощностью более 100 кВт с/кг обычно имеют отверстия для охлаждения, которые засоряются посторонними включениями из охлаждающего воздуха.

Согласно рекомендациям [15], для ГТУ с $\tilde{N} = 100\text{--}150$ кВт с/кг достаточно грубой системы фильтрации воздуха уровня G4–F5, для $\tilde{N} = 150\text{--}300$ кВт с/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 удельной мощности ГТУ, используемых в составе ПГУ отечественных ТЭЦ в первом десятилетии XXI века, лежали в диапазоне 302,2... 308,5 кВт с/кг. Класс очистки финальных фильтров КВОУ имел значения F7–F8. Удельная мощность ГТУ 701F3 (Mitsubishi) на электростанции Saltend составляет 415,2 кВт с/кг, ФТО – H12/E12. Согласно *табл. 4.2*, даже применение ФТО класса очистки F9 вместо F8 позволило 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 + F8250 000;
- импульсные фильтры400 000;
- система фильтров G4 + F8 + H14 НЕРА500 000.

Из данного сравнения видно, что капитальные затраты для систем фильтрации НЕРА в 2 раза выше, чем для обычных систем. Однако эти затраты окупаются уже в течение 6 месяцев эксплуатации.

На рис. 4.9 на примере ГТУ GT26В Alstom (GE), представлены расчеты количества пыли, проникающей в компрессор турбомашины при базовой (G2+G4+F8) и новой (G4+F7+E10) системе фильтрации атмосферного воздуха в КВОУ. В качестве исходных данных расчета взяты результаты замеров запыленности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ (рис. 4.8).

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 правомерный вопрос: если западные производители фильтров знали эту информацию еще 20 лет назад, почему они снабжали КВОУ ГТУ, поставлявшиеся в нашу страну, 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. Неважно, 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. Как следствие, повышаются затраты на эксплуатацию ГТУ.

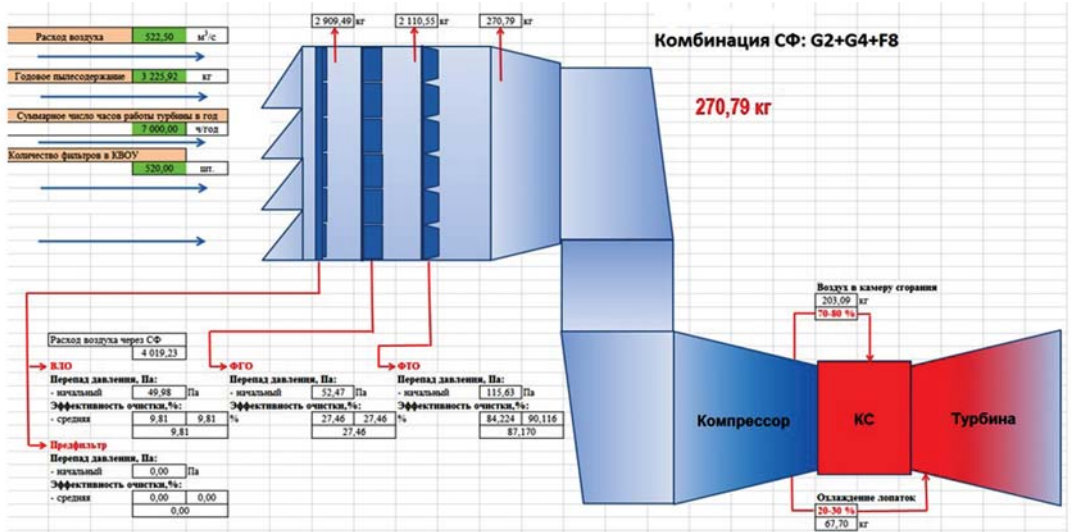
С коммерческой точки зрения персонала ГТУ, требуется самый низкий перепад давления и самая высокая эффективность работы фильтра, что прямо противоречит коммерческим представлениям поставщиков КВОУ.

Size	$\Delta \# / m^3$	$\Sigma \# / m^3$
0.3	57835690	61908130
0.5	3609188	4072438
1.0	415194	463251
3.0	26855	48057
5.0	18021	21201
10.0	3180	3180

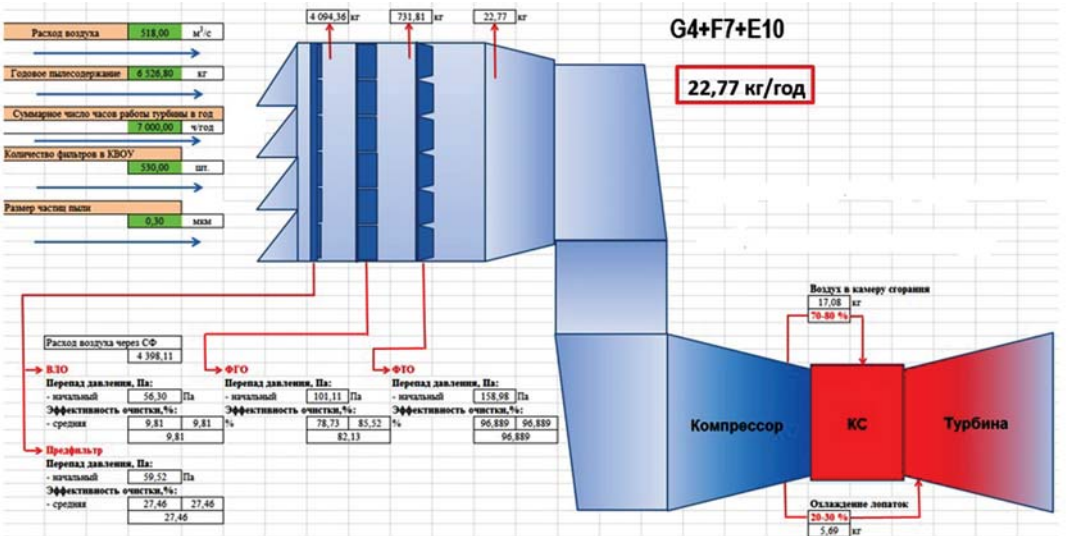
Z:021 Date: 8/11/2015
 L:location 1 Time: 08:49:16
 Sample: 00:01:00 Vol: 2.83L Alarm: No
 Flow: OK Inst: OK
 Record: 77 Records: 82 / 10000

Рис. 4.8. Результаты замера запыленности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ

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 инженерных специализаций. И сейчас в ведущих институтах и университетах, гото-



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

вающих 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 вузов 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 сайте Wikipedia Foundation: «*ре́йтинг* (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 турбомашины.

Значимые результаты в мониторинге загрязненности воздуха на всасе КВОУ энергетических ГТУ достигнуты в Москве, где в течение нескольких лет ведется 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 то же время

Результаты замеров, выполненных одновременно на ТЭЦ в ЮАО, СЗАО и ЮЗАО Москвы через равные промежутки времени, показали, что максимальные величины условных значений количества частиц в кубометре атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ варьируются как внутри филиала, так от филиала к филиалу в течение рабочего дня (табл. 4.3).

Это обусловлено внешними и внутренними факторами, влияющими на формирование фона окру-

Результаты замеров максимальных значений загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ (млн частиц/м³) *Таблица 4.3*

ТЭЦ	09:00	13:00	17:00
ЮАО	182	74	154
СЗАО	121	171	68
ЮЗАО	30	51	48

жающей среды: изменением интенсивности движения транспорта по оживленным автомобильным и железнодорожным магистралям, ростом 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 в ЮАО1 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 в ЮАО1 и ТЭЦ в ЮЗАО по прямой всего 5 км, а между ТЭЦ в в ЮАО1 и ТЭЦ в СЗАО – 13 км. При этом уровень загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ в в ЮАО1 в утренние и вечерние часы превышает этот параметр на ТЭЦ в ЮЗАО в несколько раз (табл. 4.3).

В экстремальных условиях, например лесных и торфяных пожаров, как это было летом 2010 года в Москве и Московской области, фон загрязненности атмосферного воздуха формируется общим, преобладающим над местными источниками фактором задымления с высоким содержанием частиц в кубометре атмосферного воздуха (глава 2).

Общим для трех перечисленных ТЭЦ является то, что их КВОУ ГТУ имеют трехсторонний всас и трехъярусную конструкцию. Интересным представляется распределение максимального суммарного количества частиц в кубометре атмосферного воздуха по всасам и ярусам КВОУ в различные временные интервалы дня.

Для примера на *рис. 4.10* в относительном виде приведены результаты замеров, выполненных на КВОУ ТЭЦ в СЗАО 26.10.2018.

Замеры выполнялись через каждые четыре часа. Приведенные графические зависимости показывают, что в течение рабочего дня картина распределения максимальных значений загрязнений на всасе и по яру-

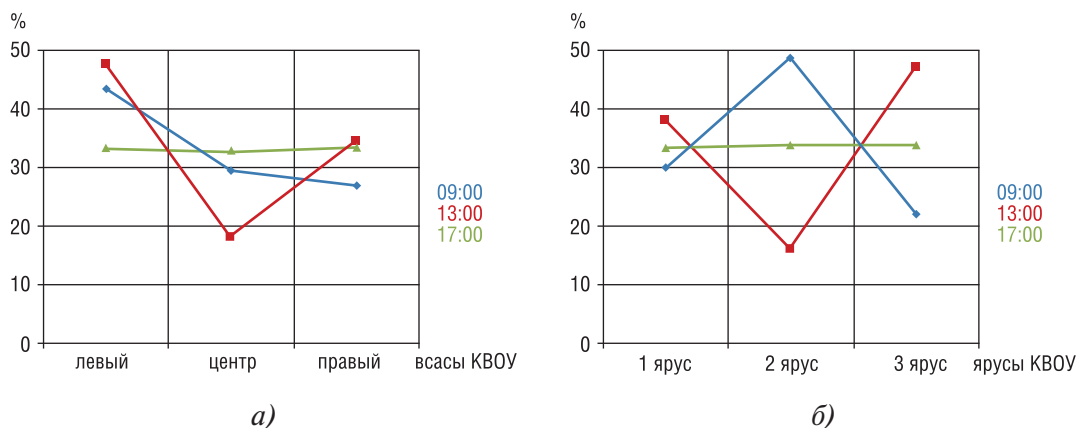


Рис. 4.10. Процентное распределение максимального количества частиц в кубическом метре атмосферного воздуха на ТЭЦ в СЗАО: а) на всасе; б) по ярусам КВОУ

сам КВОУ существенно меняется. Если в утренние и дневные часы работы оборудования ТЭЦ с высокой электрической нагрузкой при интенсивном транспортном движении (с повышенным выбросом выхлопных газов в атмосферу) на прилегающей автомобильной и железнодорожной трассе загрязненность воздуха велика, то в конце рабочего дня (при снижении интенсивности перечисленных факторов) уровень загрязненности уменьшается. Происходит выравнивание (равномерное распределение) максимального суммарного количества частиц в кубометре 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 (рис. 4.10а, б). Наибольшему воздействию загрязняющих веществ в этом временном интервале 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 этом промежутке времени происходит трансформация направлений течения воздушных потоков, приносящих максимальное количество частиц в кубометре атмосферного воздуха.

Методика определения рейтинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ

На каждой ТЭЦ ежедневно в определенное время проходит 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 мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на всасах КВОУ. Результаты замеров фиксируются и заносятся в специально разработанные таблицы мониторинга загрязненности атмосферного воздуха КВОУ ГТУ. По результатам измерений определяется максимальное суммарное количество частиц в кубометре 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 кубометре атмосферного воздуха на всех всасах и ярусах КВОУ. Определяется наибольшее значение из всех измеренных величин, которое используется при построении графика.

Аналогично исходя из поставленной цели могут строиться графики изменения загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными частицами.

Целью исследований является определение максимального количества частиц в кубометре атмосферного воздуха на всасах КВОУ ГТУ для построения рейтинга загрязненности всех ТЭЦ с ГТУ в Москве. Эта 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 (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 обусловлен ростом температуры окружающей среды до $+16-18$ °С и, как следствие, увеличением количества частиц пыли в атмосферном воздухе.

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 (рис. 4.11).

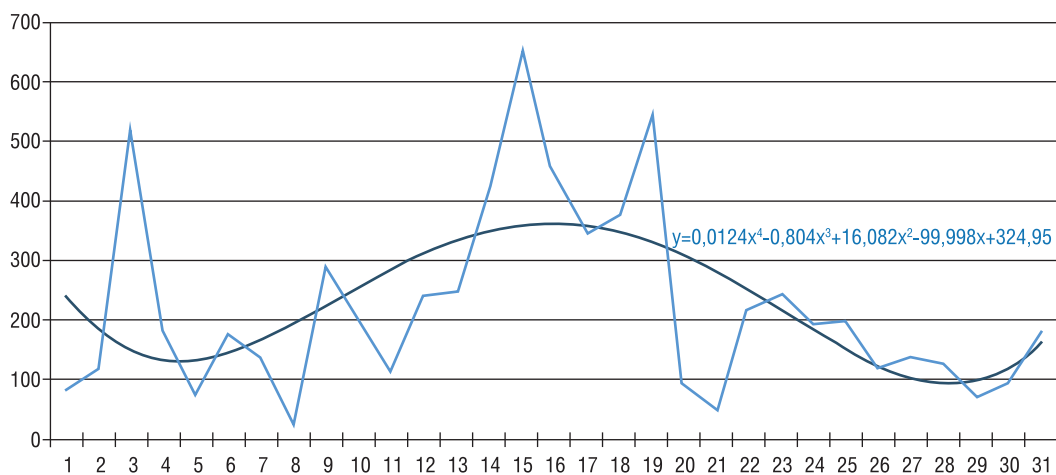


Рис. 4.11. Максимальное условное количество частиц в кубическом метре атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ в СЗАО в октябре 2018 г.

На основании ежедневно представляемых филиалами данных создается единая для всех ТЭЦ таблица максимальных условных значений количества частиц в кубометре атмосферного воздуха на всасах КВОУ ГТУ на текущий месяц. В табл. 4.4 представлены результаты замеров, выполненных на ТЭЦ с ГТУ в течение октября 2018 г.

По горизонтали приведены результаты замеров на каждой ТЭЦ ежедневно в течение недели (черный цвет). По вертикали голубым цветом отмечены ежедневные места каждой ТЭЦ в рейтинге загрязненности воздуха на всасе КВОУ. Место определяется сравнением результатов замеров, выполненных на других филиалах в тот же самый день. Чем большее количество частиц зафиксировано в кубометре атмосферного воздуха, тем выше место занимает данный филиал в рейтинге. В графе Е по горизонтали голубым цветом указывается сумма мест, занятых ТЭЦ

Замеры загрязненности воздуха на ТЭЦ с ГТУ в Москве в октябре 2018 Таблица 4.4

ТЭЦ	неделя 40						Е	неделя 41					Е	неделя 42					Е	неделя 43					Е	неделя 44			Е	Месяц	
	1	2	3	4	5	8		9	10	11	12	15		16	17	18	19	22		23	24	25	26	29		30	31	ЕЕ		М	
	116	262	560	88	60	77		157	116	102	141	473		164	264	279	483	137		269	893	168	182	120		99	203	1		8	
ЮАО1	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	2	
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	
СЗАО	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	1	
ЮЗАО	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	
ЮЗАО	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	7	
САО	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	6	
ЮАО2	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	3	
МО	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	
ЮАО2	6	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	3	
МО	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	
МО	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	5	
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	
МО	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	5	

в течение недели. На основании этих данных определяется место ТЭЦ в рейтинге за неделю (выделено красным цветом): чем 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-й и 42-й неделе), то более высокое место занимает филиал, у которого в этом промежутке времени было зафиксировано большее количество дней с наиболее высокими значениями количества частиц в кубометре атмосферного воздуха. В случае 40-й недели это ТЭЦ в ЮЗАО, а на 42-й неделе – САО.

Аналогичным образом обрабатываются результаты мониторинга загрязненности воздуха в течение всего месяца. В заключение 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 суммы ежемесячных мест, как, например, у ТЭЦ в ЮАО1 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 ЮАО1 – 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, предложенном в *табл. 4.4*, позволяет не только вести статистику результатов мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ и определять рейтинг загрязненности ТЭЦ, но и делать сравнительный анализ изменения фоновых значений загрязненности атмосферного воздуха в течение дня, недели и месяца. Например, на 42-й неделе отмечен резкий рост значений количества частиц в кубометре атмосферного воздуха на всех филиалах с ПГУ. Как отмечалось ранее на примере ТЭЦ в СЗАО, это явление было обусловлено аномальным для середины октября 2018 г. повышением температуры атмосферного воздуха.

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 разработки 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 мониторинг 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 уровень загрязнения атмосферного воздуха по временам года, оценивать жизненный цикл 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 создание 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 § 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.*

Сейчас замена воздушных фильтров на отечественных КВОУ ГТУ производится 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).

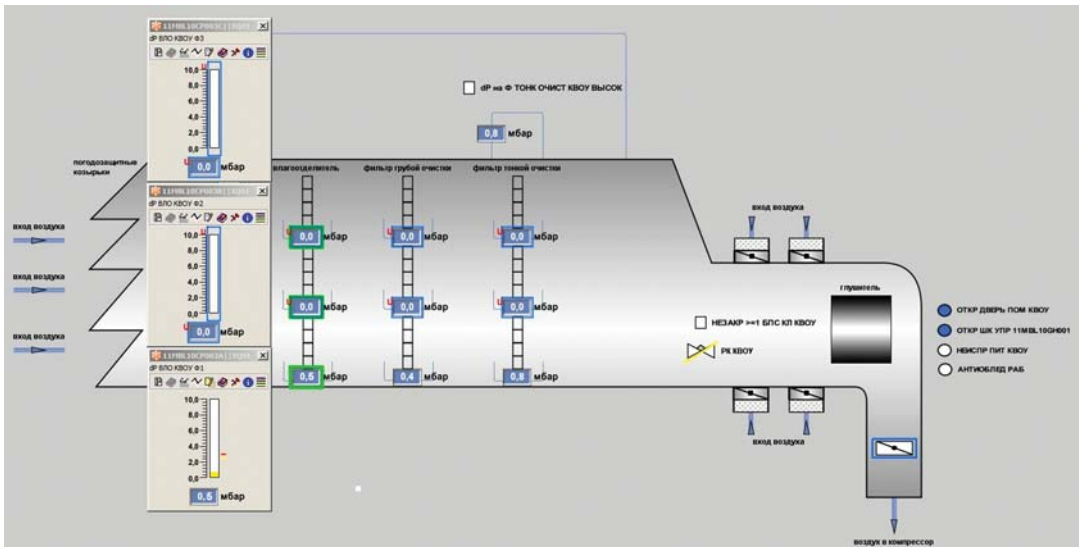


Рис. 4.12. Мнемокадр показаний датчиков давления на первом ярусе КВОУ ГТЭ-160

На *рис. 4.12* представлен мнемокадр показания датчиков перепада давления на КВОУ с односторонним всасом атмосферного воздуха энергетической ГТЭ-160 [17].

Как видно из мнемокадра, показания датчиков давления на фильтрах измеряются только на одном (нижнем) из трех ярусов КВОУ.

КВОУ энергетических ГТУ обычно имеют как односторонний, так и трехсторонний всас атмосферного воздуха. Количество ярусов КВОУ ГТУ (по высоте) – 3–4. В зависимости от мощности энергетической ГТУ на каждой ступени фильтрации КВОУ устанавливается 390–480 фильтров (для ГТЭ-160), соответственно, для ГТУ Siemens SGT5-4000F – 540 фильтров.

Из приведенных в *главе 2* примеров становится очевидно, что использования только штатных датчиков давления, поставляемых вместе с КВОУ, недостаточно для качественного мониторинга загрязненности фильтров по перепаду давления. В этом случае замена всех фильтров одной ступени очистки воздуха на всех всасах и ярусах производится 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, оснащенными 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. После получения фактических значений перепадов давления на воздушных фильтрах КВОУ ГТУ заменять можно только те фильтр-элементы, 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.

В рамках 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 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.

По плану реконструкции ВЗТ ГТЭ-160 охладительной установки циклового воздуха испарительного типа 26.05.2020 г. 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,

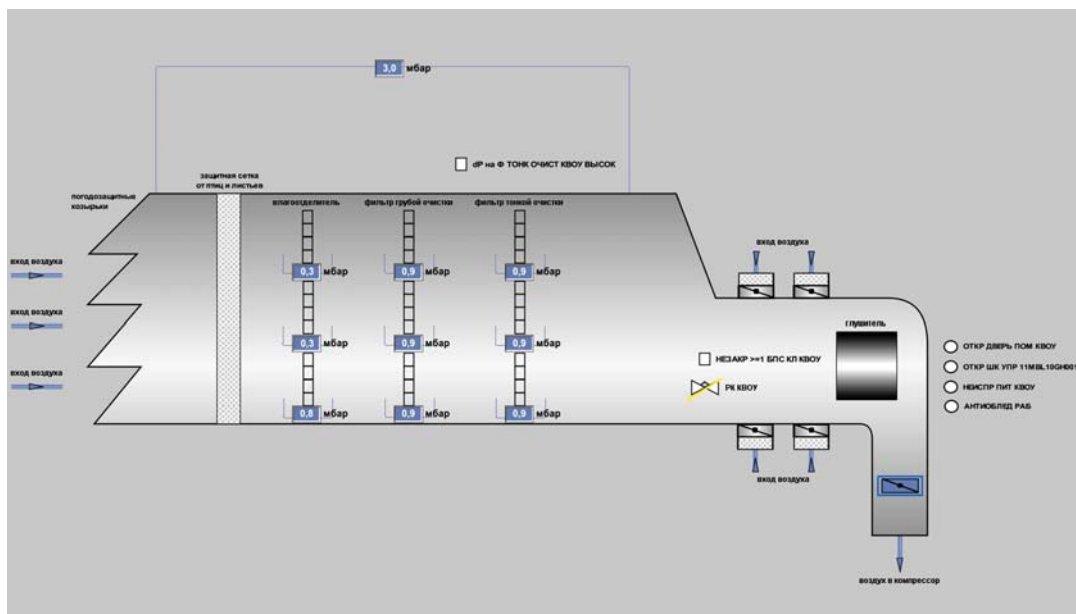


Рис. 4.14. Мнемокадр показаний датчиков давления на всех ярусах КВОУ ГТЭ-160

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.

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 г. 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 побilo 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 кубометре 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 г. было зафиксировано шестикратное увеличение количества аэрозолей. Обращает на себя внимание факт полного совпадения относительных показателей загрязненности воздуха на первом ярусе КВОУ

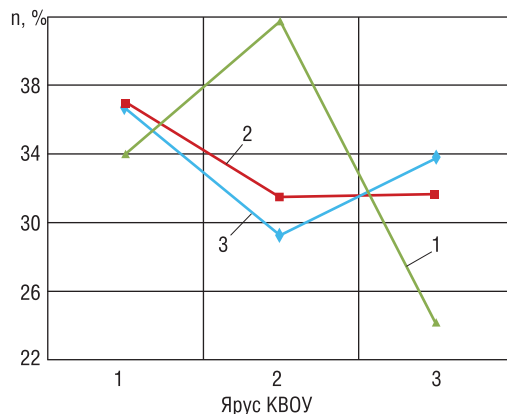


Рис. 4.15. Распределение взвешенных частиц в атмосферном воздухе по ярусам КВОУ: 1 – 25.05.2020; 2 – 29.05.2020; 3 – 28.05.2020

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-коагуляторах карманного типа класса G4, установленных на первой ступени фильтрации, фильтрах средней очистки карманного типа класса M5 и каскадных фильтрах тонкой очистки класса F9, размещенных соответственно на второй и третьей ступенях КВОУ. Показания датчиков давления на фильтрах фиксировались с момента начала дождя 29 мая через каждые 5–7 ч эксплуатации ГТУ.

Перепады давления на фильтрах КВОУ во время дождя 29.05.2020 г. Таблица 4.5

Время	Ярус 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

Перепады давления на фильтрах КВОУ во время дождя 30.05.2020 г. Таблица 4.6

Время	Ярус 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 г. По мере длительности 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 этого 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 улавливания пыли резко снижается и становится соизмеримой с эффективностью фильтра более низкого класса очистки.

По мере роста температуры наружного воздуха 29.05.2020 г. с середины дня до 18:00 перепад давления на всех фильтрах незначительно снизился, при этом тенденция наибольшего перепада давления на фильтрах-коагуляторах первой ступени сохранилась. Целесообразно отметить, 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*.

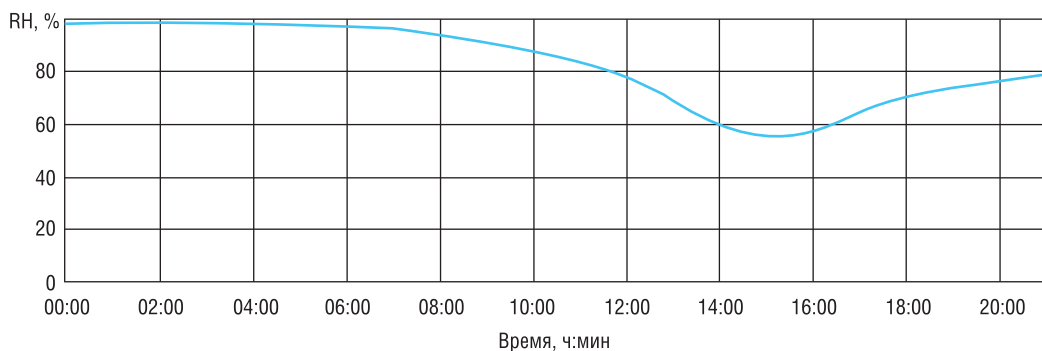
На следующий день, 30.05.2020 г. характер погоды не изменился. Архив погоды в Москве так характеризует ночь: сплошная облачность без просветов, дымка, **очень сильный ливневый дождь**, облачность более 5 баллов, **ливневые осадки**, атмосферное давление ниже нормы, температура воздуха +13...+14 °С, ветер 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 30.05.2020 г. произошел резкий скачок давления на фильтрах-коагуляторах нижнего яруса КВОУ. За 17 ч работы КВОУ с момента начала дождя 29.05.2020 г. 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 этот день в процессе мониторинга атмосферного воздуха шестикратным увеличением количества аэрозолей. Для оценки последствий такого явления необходимо помнить, что увеличение пере-

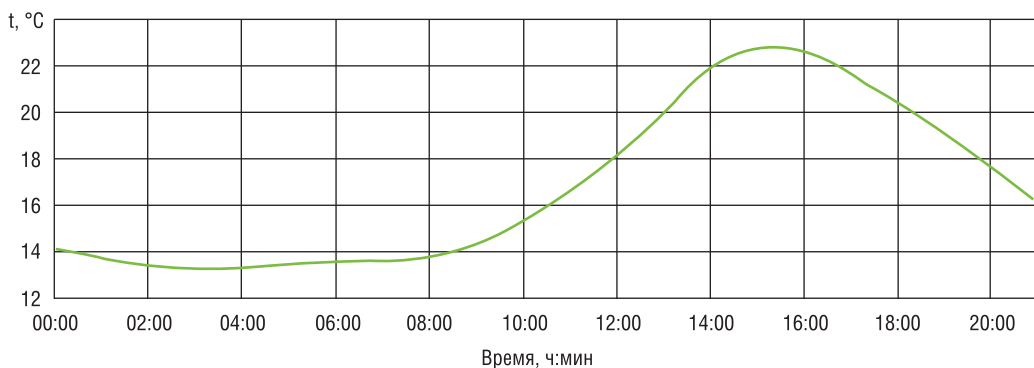
пада давления в КВОУ на 50 Па приводит к снижению выработки электроэнергии ГТУ в среднем на 0,1 % [19].

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 г. По мере снижения относительной влажности практически в 2 раза и роста температуры наружного воздуха до +23 °С к 16:00 воздушные фильтры на всех ярусах КВОУ постепенно начали просыхать, и перепад давления на них снизился. К 19:00 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 г.: 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 быть заменены при достижении давления 250 Па. В результате этого 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 проводить количественный мониторинг жизненного цикла воздушных фильтров КВОУ и оптимизировать финансовые затраты на их закупку.

3. Анализ показаний датчиков давления на всех ярусах и всасах КВОУ во время атмосферных осадков позволяет дать оценку водостойкости установленных фильтров.

4.7. Общие правила (здравый 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 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 непростая. 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 (здравого смысла) по выбору оптимальной системы фильтрации воздуха (рис. 4.17) [20].

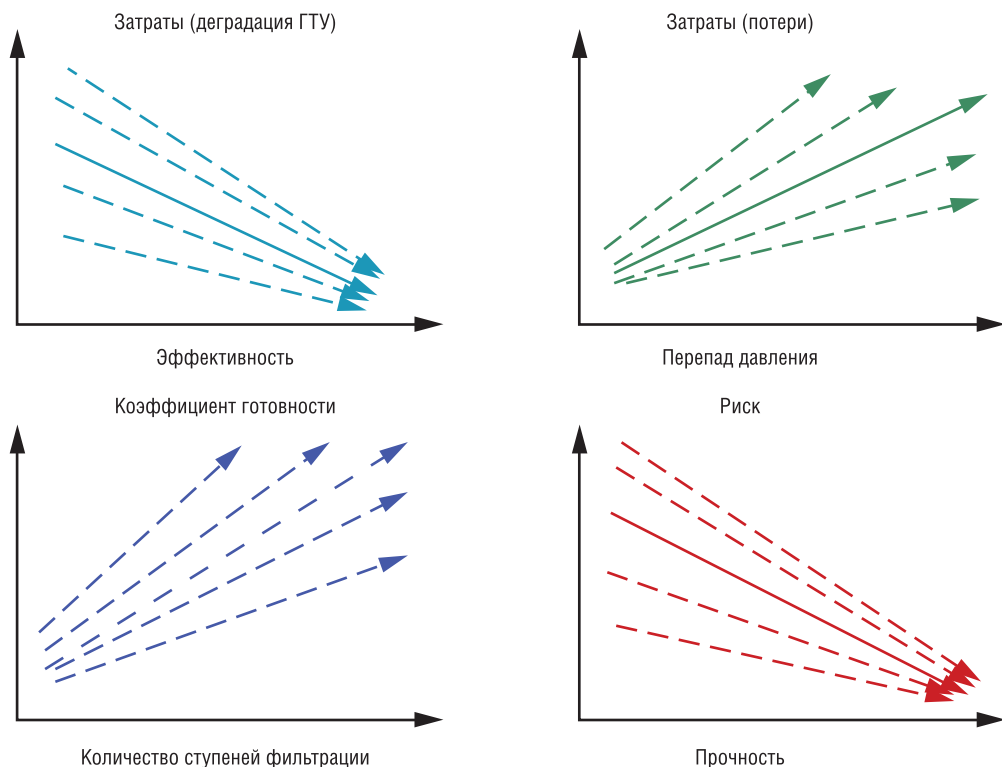


Рис. 4.17. Общие правила (здравого смысла) выбора оптимальной систем фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ

Правило № 1: с увеличением эффективности системы фильтрации (классов очистки) снижаются 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. General Electric занимает 49,66 % мирового рынка мощностей ГТУ (МВт), Siemens – 26,13 %, а Mitsubishi Hitachi Power Systems (MHPs) – 12,36 %. В такой же последовательности эти компании занимают места по количеству произведенных ГТУ [21].

Для иллюстрации правил № 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.

Из представленных зависимостей следует, что при использовании фильтров тонкой (финишной) очистки классов F7–F9 затраты, обусловленные загрязнением проточной части ГТУ (линия 3), преобладают 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 преобладающее влияние на затраты начинает оказывать перепад давления на фильтрах. Естественно, что цены фильтров более высокого класса имеют тенденцию плавного роста (линия 1). Оптимум общих затрат (кривая 4), приведенных на *рис. 4.18*, возникает при использовании фильтров класса E11.

Следует заметить, что при использовании классов очистки E12 загрязнения 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

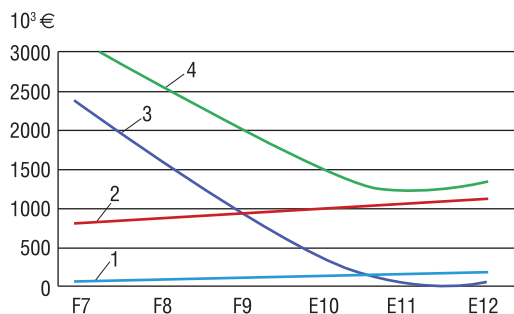


Рис. 4.18. Графическая зависимость суммарных затрат от класса очистки (эффективности) финишного фильтра КВОУ

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 счет издержек на устранение последствий деградации. Они включают в себя:

- режим эксплуатации электростанции;
- цены на энергоносители;
- цены на топливный газ;
- цены на фильтры;
- частоту 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 учетом скорости снижения выходной мощности);
- частоту промывки компрессора ГТУ.

В исследовании [23] сервисной службой компании GE Power проанализированы два варианта различных конфигураций 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 год, 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.

Общая годовая выгода от установки третьей степени фильтрации класса E11 достигает \$ 363 000. Отмечается, что полученная выгода сильно зависит от режима эксплуатации и времени работы электростанции с базовой нагрузкой и, следовательно, объема дополнительной электроэнергии, которая может быть реализована в энергосеть с получением прибыли.

Компания Siemens AB также рекомендует устанавливать современные трехступенчатые системы очистки воздуха с фильтрами конечной (финишной) ступени класса E12 [24]. Мировой опыт эксплуатации электростанций в условиях повышенной влажности показывает, 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 г. 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 в очистке воздуха от двукрылых насекомых, тополиного пуха и других загрязняющих веществ во время цветения растений. Благодаря 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. С этой целью обратимся к терминологии теории надежности [27].

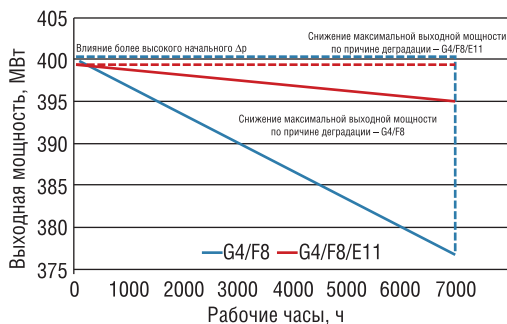


Рис. 4.19. График снижения выходной мощности электростанции для базовой и усовершенствованной системы фильтрации циклового воздуха ГТУ

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 плановых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается) называется **коэффициентом готовности** (K_g):

$$K_g = \frac{t_{\omega}}{t_{\omega} + t_p}$$

где t_{ω} – суммарное время исправной работы объекта; t_p – суммарное время вынужденного простоя.

Для перехода к вероятностной трактовке величины t_{ω} 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 ($K_{ТГ}$) – 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 $K_{ТГ}$ будет равен для:

- 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 закладывается на стадии его проектирования. На надежность объекта влияют выбор материалов (их прочность, износо- и 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 давления на разрыв (более 6000 Па) как в сухом, так и во влажном состоянии, изготовленные из гидрофобного гофрированного фильтровального материала, с вертикальной укладкой, прочной рамкой и защитной решеткой, 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. *Первая стадия* – это работа с заявками потенциальных поставщиков продукции во время открытого запроса предложений (ОЗП). Проверяется соответствие 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 мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе воздухозаборного тракта ГТУ.

Представляемая продукция 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 эффективности очистки воздушных фильтров, низкотемпературные испытания (для конкретного климатического района), давления на разрыв и водостойкость воздушных фильтров.

Эти требования обусловлены тем, что ряд поставщиков такой продукции предоставляет тесты, выполненные в собственных лабораториях, в результате чего в процессе эксплуатации выявляется несоответствие паспортных данных фильтров требованиям ТЗ.

ГОСТ 15150-69 распространяется на все виды машин, приборов и других технических изделий и устанавливает макроклиматическое районирование земного шара, исполнения, категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования изделий в части воздействия климатических факторов внешней среды.

Все требования стандарта являются обязательными (за исключением требований, установленных как рекомендуемые или допускаемые) как относящиеся к требованиям безопасности.

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 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 контроля влажности и температуры воздуха. Камеры тепла и холода для испытаний по российским ГОСТ и международным стандартам на воздействие пониженной и/или повышенной температуры 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) устанавливают 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 тепла–холода–влажности предназначены для проведения испытаний при повышенных, пониженных температурах и повышенной влажности при повышенных температурах.

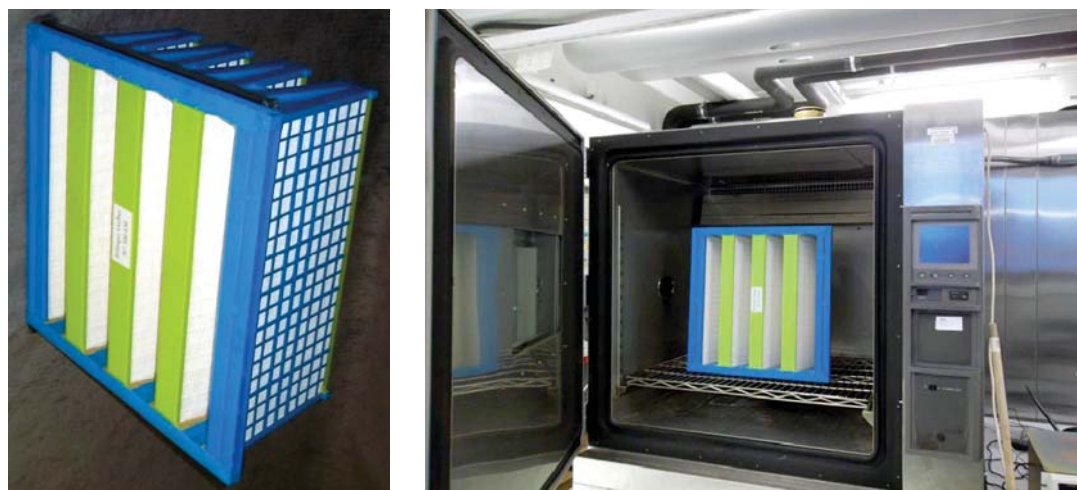
В зависимости от своего предназначения климатические камеры имеют свои технические особенности.

Ниже для примера приведены технические особенности климатической камеры тепла–холода–влажности:

- 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 размерами 592×592×300 мм, площадью фильтрации 20 кв. м (рис. 4.20а). Фильтровальный материал чистой стороны ФТО защищен пластмассовой решеткой, обеспечивающей повышенную прочность конструкции и давление на разрыв.

Целью климатических испытаний в зарубежной независимой лаборатории являлось подтверждение начального перепада давления и эффек-



а)

б)

Рис. 4.20. Фильтр тонкой очистки: а) перед тестом; б) в климатической камере [33]

тивности воздушного фильтра до и после нахождения фильтра тонкой очистки при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение нескольких часов.

Перед проведением испытания в климатической камере ФТО тестировался на начальный перепад давления и эффективность. Затем 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) для района «ХЛ» согласно ГОСТ 15150-69.

На рис. 4.20б изображен ФТО, установленный в климатической камере тепла и холода. Термограмма испытаний фильтра тонкой очистки приведена на рис. 4.21. ФТО выдерживался в течение 7 часов 20 минут при температуре $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, после чего постепенно (за 1,5 часа) температура окружающей среды была снижена до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Фильтр выдерживался при этой температуре в течение 8 часов, затем температура была повышена так же постепенно до начального уровня $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

После проведения климатических испытаний осуществлялся визуальный контроль состояния фильтра 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 сравнительного анализа. Каких-либо нарушений целостности фильтр-элемента после климатических испытаний зафиксировано не

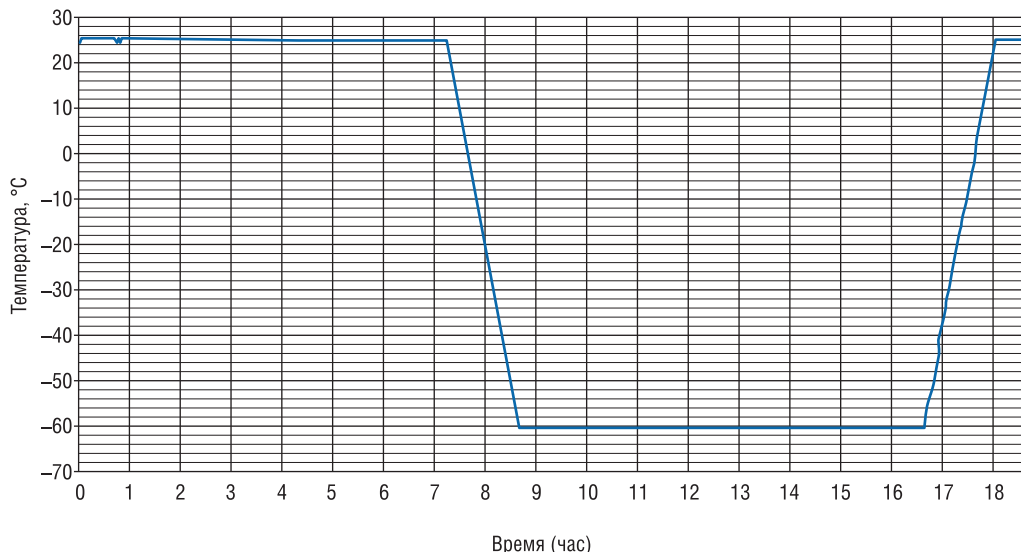


Рис. 4.21. Термограмма испытания фильтра тонкой очистки

было. После этого на аэродинамическом стенде определялся начальный перепад давления.

На рис. 4.22 представлены результаты тестирования фильтра до и после испытания в климатической камере.

Как видно из представленных данных, результаты замеров до и после климатических испытаний легли на одну кривую, т. е. 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 в табл. 4.7 представлены результаты тестирования ФТО по определению его эффективности согласно ГОСТ Р ЕН 779:2014.

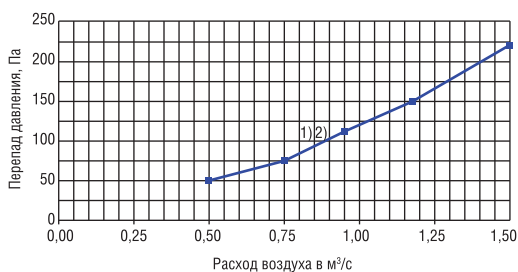


Рис. 4.22. Графики начального перепада давления фильтра: 1 – до; 2 – после климатических испытаний

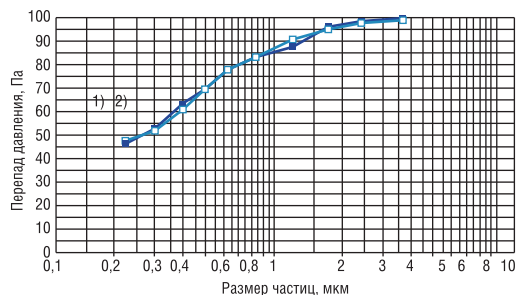


Рис. 4.23. Графики эффективности фильтра: 1 – до; 2 – после климатических испытаний при -60 °C в течение 8 часов

Эффективность фильтра до и после испытаний

Таблица 4.7

Размер частиц, мкм		Эффективность, %	
Интервал	Средний	До КИ	После КИ
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 климатических испытаний (КИ) 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 проводятся 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 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ по причине хрупкости пластмассового материала.

Для подтверждения результатов визуального контроля фильтров после климатических испытаний целесообразно их тестирование масляным туманом согласно стандарта EN 1822-4 (ГОСТ Р EN



Рис. 4.24. Скол пластмассы рамки фильтра после испытаний в климатической камере

1822-4) и определение водостойкости статическим (гидростатическим давлением) или динамическим (распылом воды через форсунки) способом [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 протестировать свое оборудование для более жестких климатических условий. Однако потребитель, эксплуатирующий свое оборудование в районах с более мягкими климатическими условиями, не имеет права требовать от поставщиков 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, проводившая тендерную процедуру для ТЭЦ в районе Сочи, потребовала от поставщика воздушных фильтров тесты низкотемпературных испытаний с глубиной заморозки до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для климатических условий Москвы также недопустимо требование заказчика тестировать технические изделия при температурах $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, поскольку столичный регион относится к зоне с умеренным климатом, где средняя из ежегодных абсолютных максимумов температура воздуха не выше $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а средняя из ежегодных абсолютных минимумов температура воздуха не ниже $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$. В табл. 4.8 приведены суточные рекорды температуры атмосферного воздуха в Москве за всю историю метеонаблюдений [36].

Суточные рекорды температуры в Москве за всю историю метеонаблюдений

Таблица 4.8

Место	Самый жаркий день, $^{\circ}\text{C}$	Дата	Метеостанция	Самый холодный день, $^{\circ}\text{C}$	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. Воздушные фильтры в климатических камерах должны тестироваться в точном соответствии с техническим заданием на продукцию и ГОСТ 15150-69 для конкретного макроклиматического районирования.

Последующие стадии входного контроля воздушных фильтров

Вторая стадия входного контроля предусматривает внешний осмотр образцов фильтров, представленных потенциальными поставщиками во время ОЗП. Процедура включает внешний осмотр, проверку отсутствия повреждений, соответствия 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 проводится во время поставки воздушных фильтров заказчику. Определяется процент от общего объема поставки, подвергаемый выборочному входному контролю. Процедура отличается от второй стадии только тем, что в данном случае проверяются серийные воздушные фильтры, а не специально подготовленные 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 необходимо проводить тестирование не образцовых, а серийных фильтр-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 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.

Обследовались новые серийные кассетные ФТО марок MV и MVX классов очистки F8-F9, отличающиеся габаритными размерами (табл. 4.9).



Рис. 4.26. Независимый институт VTT (Финляндия)

Параметры новых ФТО MV–MVX

Таблица 4.9

Тип	Габаритные размеры, мм	Паспортные/измеренные/расхождение		
		Площадь фильтрации, кв. м	Начальный перепад давления P, Па (%)	Класс энергоэффективности (Eurovent)
MV–F8	592×592×592	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			87/89/2 (+2,3 %)	A+/A+/A+

Для полной идентификации этих фильтров проверялось соответствие их паспортных данных техническим характеристикам, приведенным на официальном сайте 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 сайте производителя, полностью идентичны.

Перед тестированием выполнялся внешний осмотр, фильтры взвешивались. Во время внешнего осмотра ФТО видимых повреждений не обнаружено. В табл. 4.10 представлены сравнительные данные по паспортной и фактической массе этих фильтров.

Масса фильтров ФТО MV, MVX (г)

Таблица 4.10

Тип	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 фильтр-элементов 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 образцы фильтров тестировались 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.

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 видим, начальные перепады давления ФТО, зафиксированные при тестировании на испытательных стендах институтов VTT и SP,



Рис. 4.27. ФТО MVX класса F9 на испытательном стенде

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 Р ЕН 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 пределах ± 3 % от значения измеряемой величины. Следовательно, результаты измерения начального перепада давления фильтра MVX-F9 находятся в пределах точности измерений стенда.

Следует отметить, что по требованиям 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 высокий класс своей энергоэффективности: MV-F8 (F9) и MVX-F8 – класс А, а MVX-F9 – класс А+ согласно Eurovent 4/21-2014.

Безусловно, что КПД 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 провести ее осмысленный выбор, приводящий к увеличе-

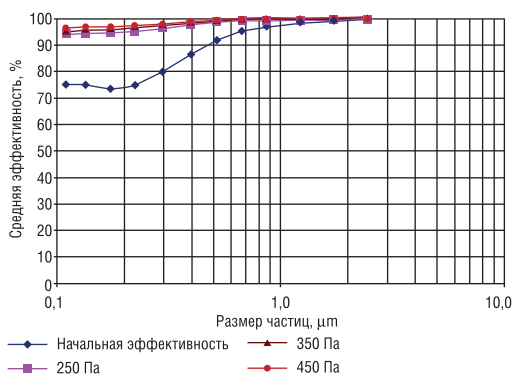


Рис. 4.28. График изменения начальной и средней эффективности фильтра MVX-F9 в зависимости от перепада давления

нию эффективности работы энергетического оборудования.

Другим, не менее важным параметром воздушных фильтров является их класс очистки, который определяется в процессе тестирования подачей на них специального тестового аэрозоля. 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 графиков, с ро-

стом перепада давления на фильтре, обусловленного подачей тестового аэрозоля, эффективность очистки воздуха возрастает.

Все протестированные в лабораториях независимых институтов фильтры тонкой очистки 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.

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. Визу-



Рис. 4.29. Тест на водостойкость фильтра MVX-F9



Рис. 4.30. Фильтр MVX–F9 после тестирования на разрыв

альный осмотр фильтра используется для определения повреждений фильтра при различных значениях перепада давления. Фильтр-элемент тестируется до разрыва (визуальное повреждение) или до достижения максимальной мощности вентилятора испытательного стенда. На рис. 4.30 показан фильтр MVX–F9 турецкой компании М 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 %-ном 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. Так 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 до достижения на них предельно-допустимого перепада давления согласно ГОСТ.

Такие меры контроля качества поставляемой продукции на стратегические объекты, к которым относятся ТЭЦ, обусловлены тем, что в процессе эксплуатации было установлено отличие характеристик образцов фильтр-элементов, представляемых на входной контроль, от параметров серийной продукции. Это не в последнюю очередь связано с тем, что ряд иностранных производителей воздушных фильтров локализовали свое производство в нашей стране, но при этом не осуществляют должного контроля 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), известном под аббревиатурой SP (рис. 4.31). Шведский научно-исследовательский институт SP 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 Toras.

Обследовались новые серийные ФТО классов очистки F7–E11, паспортные технические характеристики которых представлены в табл. 4.11.

Для полной идентификации фильтров тонкой очистки проверялось соответствие их паспортных данных техническим характеристикам, представленным на официальном сайте производителя. В паспортах фильтров E10–31/38 и E11–31/38, указано, что они произведены за рубежом, однако на сайте производителя фильтры с таким обозначением отсутствуют. Там приведены технические характеристики фильтров E10–31, E10–38 и E11–31, E11–38 (числа 31 и 38 обозначают площадь фильтрации). Для конкретного типа фильтров даны величины начального перепада давления (табл. 4.11).



Рис. 4.31. Независимый научно-исследовательский институт SP (Швеция)

Параметры новых ФТО немецкой компании E

Таблица 4.11

Паспортные				Измеренные			Данные с сайта производителя
Класс	Размеры, мм	Площадь фильтрации, кв. м	Начальный перепад давления P, Па	Площадь фильтрации, кв. м	Начальный перепад давления P, Па	Превышение измеренного P над паспортным, Па (%)	Начальный перепад давления P, 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

В паспортах фильтров E10–31/38 и E11–31/38, несмотря на их обозначение, указано, что площадь фильтрации равна 38 кв. м. Не совсем понятно, о какой площади фильтрации идет речь (общей или эффективной, участвующей в процессе фильтрации) и зачем приводится двойное обозначение, отличающееся от информации на сайте. Следует отметить, что на лейблах ФТО E10–31/38 была указана площадь фильтрации >38 кв. м. *Это противоречит информации, представленной в паспортах фильтров и на официальном сайте.*

В институте SP расчетом была проверена эффективная площадь фильтрации E10–31/38, которая составила 28,8 кв. м. В качестве ремарки заметим, что эффективная площадь фильтрации не может отличаться от общей на 10 кв. м. В результатах теста фильтра E10–31, выполненного в собственной лаборатории западного производителя, указано, что эффективная площадь фильтрационного материала равна 27,15 кв. м.

Эффективная площадь фильтрации E11–31/38 определялась двумя способами: расчетом и препарированием. Расчетная площадь фильтрации составила 32 кв. м, а методом препарирования – 31,7 кв. м. У остальных тестируемых фильтров эффективная площадь фильтрации

определялась расчетом. Для фильтров F7–F8 она составила 18 кв. м, а для F9 – 21,3 кв. м (табл. 4.11).

Как видно из данных табл. 4.11, начальные перепады давления ФТО на официальном сайте 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 сайте 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 A+, согласно Eurovent 4/21-2014, хотя фильтры этого производителя не аттестованы компанией Eurovent. Поэтому такая информация отсутствует на официальном сайте производителя фильтров.

Налицо противоречие технических характеристик, представленных на официальном сайте западного производителя этой продукции и в паспортах фильтров российского дилера этой компании.

Перед тестированием выполнялся внешний осмотр и взвешивание фильтров. Видимых повреждений во время внешнего осмотра ФТО не обнаружено. Согласно рекомендациям компании FAIST AIS, при реверсной установке фильтров пластмассовая защитная сетка должна быть установлена на чистой стороне фильтр-элемента, т. е. в его V-образных секциях. Однако защитных сеток на фильтре F7-20RF не было обнаружено. На рис. 4.32 показано взвешивание ФТО, а в табл. 4.12 представлены весовые значения новых фильтров.

После взвешивания для проверки герметичности и наличия свищей в фильтровальном материале фильтр-элементы тестировались так называемой масляной нитью. В процессе этого теста пары масла подаются внутрь фильтр-



Рис. 4.32. Взвешивание ФТО класса E10

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 паспортах. Результаты определения фактических значений этих параметров ФТО и сравнение их с паспортными значениями приведены в *табл. 4.12*.

Весовые значения новых фильтров немецкой компании E

Таблица 4.12

Фильтр	Паспортные данные, г	Измеренные значения, г	Разница
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

На *рис. 4.34* изображен фильтр E10–31/38, установленный на испытательном стенде института SP.

Согласно ГОСТ Р ЕН 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 ± 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 ± 3 %.



Рис. 4.33. Тестирование фильтра E11–31/38 масляной нитью

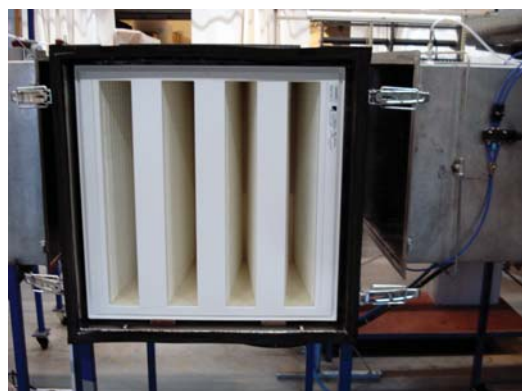


Рис. 4.34. Фильтр E10–31/38 на испытательном стенде института SP

Ошибка в определении эффективности фильтрации фильтр-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 стандартам 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 от данных, представленных как на официальном сайте производителя, так и в паспортах фильтров. В процессе эксплуатации новых фильтров F7–20RF, установленных реверсно к финишному ФТО, был определен фактический начальный перепад давления на фильтре 102 Па, что практически совпало с результатами стендовых испытаний (100 Па) и полностью противоречит паспортным данным фильтра (70 Па). Поскольку на сайте 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 и на сайте 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 эксплуатации, составил 107 Па, а результат теста на испытательном стенде – 106 Па. Согласно паспортным данным этих фильтров, представленным российским дилером, начальный перепад давления равен 88 Па, при этом на сайте головного офиса производителя указано 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 в *табл. 4.11* данных, отклонение фактических значений начального перепада давления на этих ФТО от паспортных значений составляет от 20 до 40 %. Наименьшее различие между паспортными и фактическими значе-



Рис. 4.35. Начальный перепад давления фильтра E10–31/38, зафиксированный во время тестирования

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.

ниями начального перепада давления зафиксированы для ФТО E11–31/38 (7,1 %).

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 с при заполнении V-секции фильтра

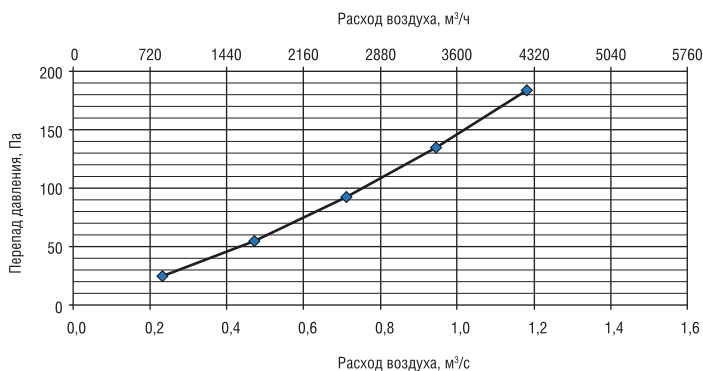


Рис. 4.36. График изменения перепада давления на фильтре E10–31/38 от расхода воздуха

На сайте немецкого производителя фильтров представлены более реалистичные данные начального перепада давления. Там нет и 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 в 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 за-

просах 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 институтов. 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 такая ситуация с начальным перепадом давления сложилась только с кассетными фильтрами тонкой очистки этого поставщика, сравним рассматриваемый параметр фильтра грубой очистки класса G4 одного типоразмера на сайте производителя и в паспорте фильтра его поставщика на отечественный рынок. На сайте головного офиса начальный перепад давления фильтра равен 55 Па, а в паспортах фильтров, представляемых дистрибьютором, фигурирует величина 45 Па. Т. е. занижение в паспортах фильтров 22,2 %. Таким образом искусственно расширяется диапазон работы фильтра на 10 Па 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 энергетических компаний от занижения реальных значений начального перепада давления на фильтрах КВОУ ГТУ недобросовестными поставщиками могут исчисляться сотнями миллионов рублей.

В этой ситуации уместно вспомнить слова таможенника П. А. Верещагина (кинофильм «Белое солнце пустыни»), который ценой своей жизни отстаивал интересы страны:

За державу обидно!



Рис. 4.37. Течь воды через стык фильтровального материала и рамки фильтра E11–31/38

Резюме

Принципиально выполненный входной контроль воздушных фильтров для КВОУ ГТУ является действенным средством пресечения проникновения на стратегические объекты нашей страны некачественной и неэффективной продукции, изготовленной недобросовестными иностранными производителями и отечественными дистрибьюторами в процессе локализации производства импортного оборудования в нашей стране.

Входной контроль должен играть 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 класса очистки фильтр-элементов конечной (финишной) очистки КВОУ не всегда ведет к желаемому результату.

При использовании фильтров класса 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 кв. м [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.

В *табл. 4.13* приведены технические характеристики кассетных фильтров шведской компании С классов очистки F8–E12 глубиной 600 мм.

Как видно на *рис. 4.38в*, кассетные фильтры компании С глубиной 600 мм имеют мощную пластмассовую рамку и защитную решетку фильтровального материала, изготовленного из стекловолокна с вертикальной укладкой внутри фильтра. Конечный перепад давления 600 Па. Давление на разрыв фильтра превышает 6250 Па. Фильтры предна-



а)

б)

в)

Рис. 4.38. Кассетные фильтры шведской компании С глубиной: а) и б) 292 мм, в) 600 мм

Технические характеристики кассетных фильтров классов глубиной 600 мм [41]

Таблица 4.13

Тип	EN779	EN1822	ISO 16890	Размеры, мм	Расход воздуха, давление, м ³ /ч/Па	Площадь фильтрации, кв. м	Вес, кг
CamGT 3V 600–F8–Std	F8		ePM1 80 %	592×592×600	4250/100	41	15
CamGT 3V 600–E10–Std		E10			4250/135	45	16
CamGT 3V 600–F9–Std	F9		ePM1 85 %		4250/115	38	15
CamGT 3V 600–E11–Std		E11			4250/140	48	16
CamGT 3V 600–E12–Std		E12			4250/190	50	17

значены для эксплуатации при температуре окружающей среды 70 °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.

В 2021 году компания С сообщила об оптимизации 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, что предполагало достижение следующих целей:

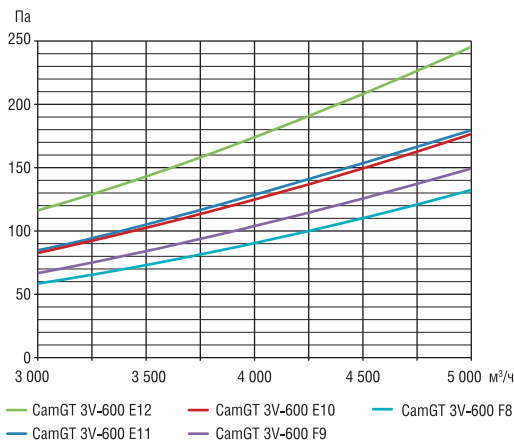


Рис. 4.39. Графики перепада давления на фильтрах 600 мм в зависимости от расхода воздуха

была установлена двухступенчатая система фильтрации с фильтром грубой очистки (ФГО) класса G4 и финишным фильтром 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 каналов для отвода влаги из фильтров на грязную сторону воздуха, что вело к деградации двигателя.

После обследования местности компания С предложила 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 три останова ГТУ для замены ФГО. Новая система фильтрации даже через два 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 и уменьшению загрязнения AG Power сэкономит около 650 тыс. нм³ топлива. Кроме того, выбросы углекислого газа снизились на 1100 тонн в год.

Другим производителем кассетных фильтров глубиной 600 мм является компания FAIST AIS, производитель ВЗТ и воздушных фильтроэлементов для КВОУ ГТУ. В табл. 4.14 представлена спецификация ее фильтров, имеющих обозначение FVXX [43].

- 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, средняя относительная влажность воздуха 75 %.

Первоначально на КВОУ ГТУ

Спецификация фильтров FVXX

Таблица 4.14

Габаритные размеры, мм	592×592×600
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
Масса, кг	17
Номинальная площадь, кв. м	50
Материал	водоотталкивающее микростекловолокно
Материал разделителей	термоплавкий клей
Уплотнение	пенополиуретан
Рамка	АБС
ASHRAE DHC при 650 Па, г	2000
Давление на разрыв, Па	>6250

На рис. 4.40 приведена зависимость перепада давления на фильтрах серии FVXX от расхода воздуха.

В табл. 4.15 приведены значения начального перепада давления и пылеемкость кассетных фильтров класса E11 различной глубины [44].

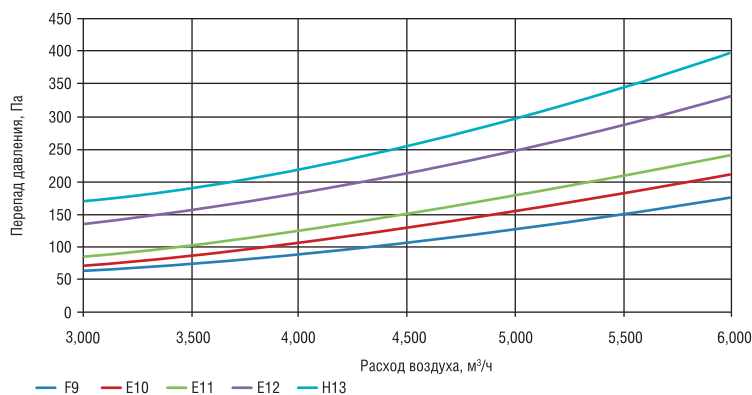


Рис. 4.40. График зависимости перепада давления на фильтрах серии FVXX от расхода воздуха компании FAIST AIS

Начальный перепад давления, пылеемкость и площадь фильтров класса E11 различной глубины компании FAIST AIS

Таблица 4.15

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, кв. м	50	32	20

Сравнивая технические характеристики кассетных фильтров глубиной 600 мм шведской компании С и немецкой компании FAIST AIS класса E11, приходим к выводу, что они практически идентичны (табл. 4.13 и 4.15). Заметное отличие в пользу FAIST AIS состоит в большей площади фильтрации (2 кв. м).

Опираясь на результаты определения пылезадерживающей способности фильтров, полученные в испытательной лаборатории, компания

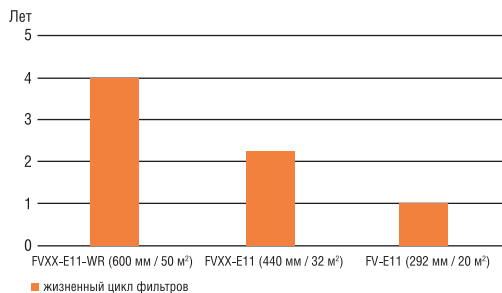


Рис. 4.41. Прогноз срока службы воздушных фильтров класса E11 различной глубины

FAIST AIS 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 AIS делает вывод, что приведенные на рис. 4.41 показатели срока службы фильтров справедливы.

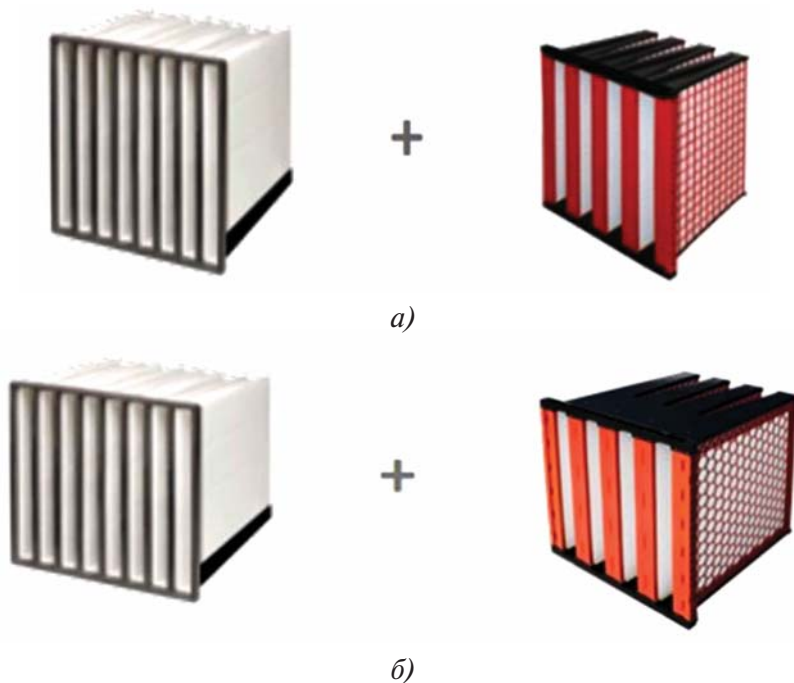


Рис. 4.42. Система фильтрации компании FAIST AIS: а) старая; б) новая с фильтрами 600 мм

В качестве успешного применения кассетных фильтров класса E11 глубиной 600 мм приводится пример улучшения системы фильтрации КБОУ 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 AIS (рис. 4.42a). В сентябре 2015 года FAIST AIS усовершенствовала систему, оснастив ее фильтрами FVXX-E11-WR (600 мм) с теми же фильтрами первой ступени (рис. 4.42б).

Известно, что фильтры, изготовленные по технологии Drop-Safe, являются лучшими на сегодняшний день коагуляторами атмосферной влаги. Кассетные фильтры серии FVXX, как и все другие кассетные фильтры компании FAIST AIS, снабжены прочными защитными решетками и выдерживают давление на разрыв более 6250 Па.

В результате установки новых ФТО класса E11 глубиной 600 мм снизилась амплитуда колебаний перепада давления, отмеченная на старой системе фильтрации с более короткими финишными фильтрами (желтая пунктирная линия, рис. 4.43).

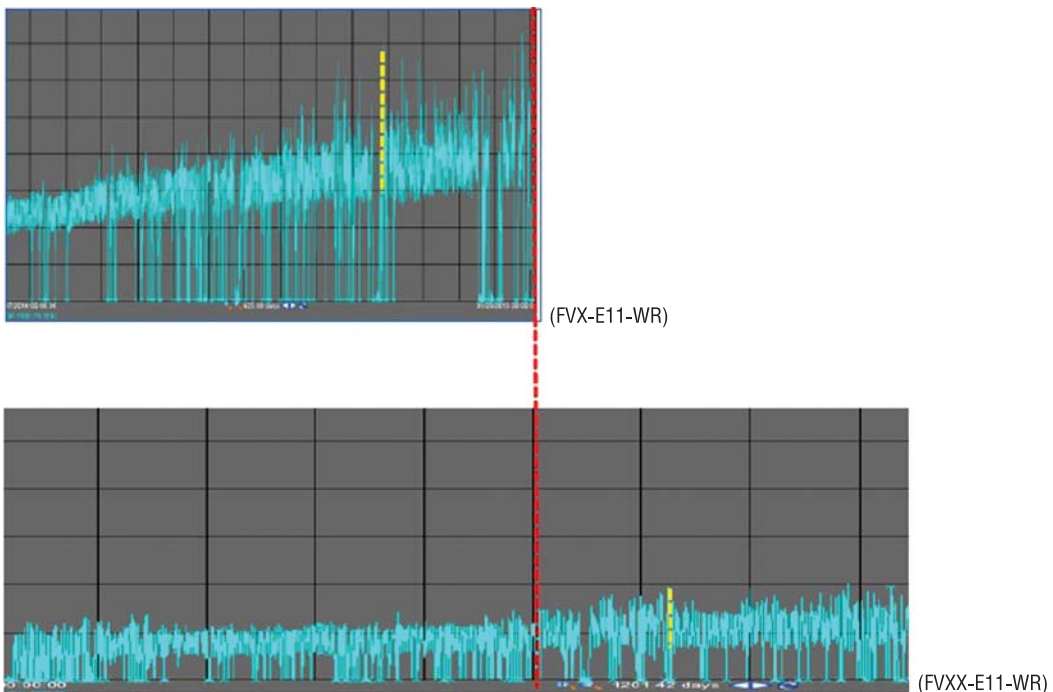


Рис. 4.43. Сравнение колебаний перепада давления на старой и новой системе фильтрации

Увеличился жизненный цикл системы фильтрации циклового воздуха энергетической ГТУ, снизились затраты на закупку фильтров, возросла выработка электроэнергии.

В информационном письме от 02.10.2021 компания Siemens Energy [45] ставит в известность потребителей воздушных фильтров компании FAIST AIS, что в условиях высокой запыленности (как в Бангладеш, Пакистане, Египте, Нигерии, ОАЭ и т. п.) **рекомендуется** использовать фильтрующие элементы наибольшей глубины и площади поверхности. Особенно 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.

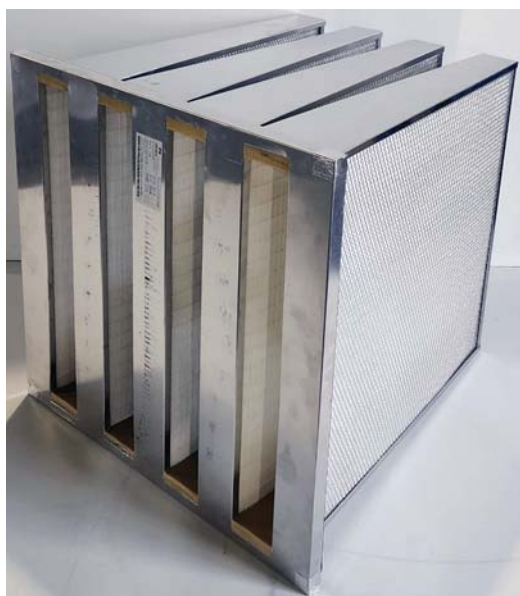
Примечание: при дооснащении оператор должен убедиться, что дополнительный вес и изгибающий момент фильтров с большим осевым размером — до 20 кг при загрузке на глубину 600 мм — приемлемы для удерживающих рам КВОУ.

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 AIS класса Е не превышает 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).

Особенностью этих фильтров является алюминиевая рамка (рис. 4.44а). Фильтровальный материал на чистой стороне защищен алюминиевой решеткой (рис. 4.44б). Поэтому фильтры этой серии весят порядка 20 кг, что в принципе соответствует требованиям Siemens Energy. Однако мы убеждены, что финишные фильтры КВОУ энергетических ГТУ в своей конструкции не должны содержать металлических изделий. Поэтому использование таких фильтров в электроэнергетике нецелесообразно, несмотря на то что давление на разрыв превышает 6000 Па. Эти фильтры целесообразно применять в воздухоочистительных устройствах нероторных механизмов, эксплуатируемых в морской и прибрежной зоне с высоким уровнем агрессивного воздействия мор-



а)



б)

Рис. 4.44. Внешний вид фильтров глубиной 600 мм компании М [46]:
а) вид с фронта; б) вид сверху

Технические характеристики фильтров серии MVZ

Таблица 4.16

Класс	Ширина, мм	Высота, мм	Глубина, мм	Площадь материала, кв. м	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

ской воды и соли. Технические характеристики фильтров приведены в табл. 4.16 [46].

Зависимости перепада давления воздушных фильтров серии MVZ компании М от расхода воздуха представлены на рис. 4.45 [46].

Для выбора той или иной системы фильтрации циклового воздуха энергетической ГТУ необходимо провести сравнительный анализ всех затрат в течение срока эксплуатации в конкретных климатических условиях.

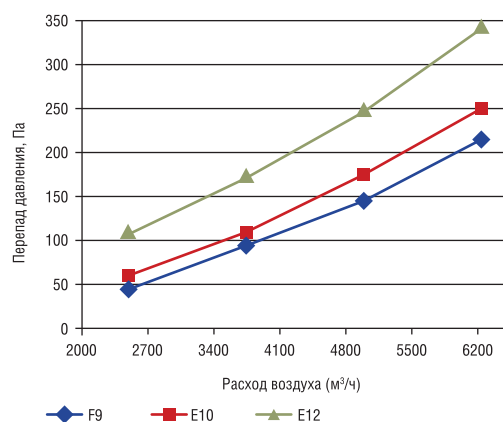


Рис. 4.45. График зависимости перепада давления от расхода воздуха фильтров серии MVZ

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 технико-экономического обоснования или оценки срока окупаемости используют лишь такой показатель, как первоначальная стоимость фильтр-элементов, не принимая во внимание, что она составляет лишь несколько процентов 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.

Сейчас именно уменьшение затрат жизненного цикла и определяет основные тенденции развития оборудования.

Проведем 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].

Перед выполнением расчетов все фильтр-элементы базовой и новой системы фильтрации тестировались 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

Характеристики фильтров базовой системы очистки циклового воздуха ГТУ

Таблица 4.17

Фильтры	G4 панельный	G4 карманный	F8 кассетный
Кол-во фильтров	540	537	537
Материал	Синтетика	Синтетика	Стекловолокно
Размеры, мм	592×592×96	592×592×200	592×592×300
Площадь фильтрации, кв. м	2	1,5	20,0
Расход воздуха, м ³ /ч	3400	3400	3400
Начальный ΔР, Па	58/68*	40	90
Конечный ΔР, Па	450	250	450

* фактическое значение

было установлено, что начальный перепад давления на панельном фильтре первой ступени на 10 Па выше, чем было заявлено в паспорте партии фильтров (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.

С целью повышения эффективности системы фильтрации предлагается повысить класс очистки ФГО до М6, а ФТО до Е10. Результаты оценки эффективности трехступенчатой системы фильтрации воздуха КВОУ по схеме G4+M6+E10 представлены в табл. 4.18.

Расчет проникновения частиц пыли в проточную часть ГТУ

при работе в климатических условиях сельскохозяйственной зоны

Таблица 4.18

Размер частиц, мкм	Кол-во частиц в кубометре атмосферного воздуха с/х	Базовая система фильтрации G4 + G4 + F8		Новая система фильтрации G4 + M6 + E10	
		Средняя эффективность ФТО, E _М %	Кол-во проникших частиц в куб. м	Средняя эффективность ФТО, E _М %	Кол-во проникших частиц в куб. м
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

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 раза 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 агрегаты, которые работают на угле. Наиболее интенсивное загрязнение фильтров КВОУ происходит при разгрузке угля из вагонов, и старые агрегаты 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.

Для оценки эффективности новой системы фильтрации в случае эксплуатации в сложных климатических условиях мы использовали результаты замеров атмосферного воздуха в Москве в 2010 году, когда горели торфяники и леса в Московской области [49].

Наибольший перепад давления тогда 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 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*.

Очевидно, что при таких условиях окружающей среды базовая система фильтрации воздуха малоэффективна. Количество пыли, поступающее в проточную часть ГТУ при таких климатических условиях через обе системы фильтрации, в 20 раз превысило аналогичный показатель

Расчет проникновения частиц в проточную часть ГТУ при работе в экстремальных климатических условиях (пожары)

Таблица 4.19

Размер частиц, мкм	Кол-во частиц в кубометре атмосферного воздуха, Москва, 12.08.2010	Базовая система фильтрации G4+G4+F8		Новая система фильтрации G4+M6+E10	
		Средняя эффективность ФТО, Е _М %	Кол-во проникших частиц в куб. м	Средняя эффективность ФТО, Е _М %	Кол-во проникших частиц в куб. м
0,3–0,5	249 456816	88,2	27 128 041	98,5	704 053
0,5–1,0	32 140306	94,2	1 419 159	99,5	15 572
1,0–3,0	1 526576	97,55	37 401	99,99	153

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 % меньше, 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 благодаря низкому начальному перепаду давления и высокой пылеемкости. Гофрированные сепараторы и прочная конструкция делают фильтр особенно эффективным (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 E10, глубиной 600 мм и увеличенной поверхностью фильтрации 45,3 кв. м (табл. 4.20).

Выбор финального фильтра для КВОУ с такой эффективностью и габаритными размерами был обусловлен опытом эксплуатации ГТУ в условиях пожаров в 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 SP (Швеция). Результаты теста полностью подтвердили технические характеристики, приведенные в паспорте

Расчет срока службы фильтров системы очистки циклового воздуха ГТУ при эксплуатации в различных климатических условиях

Таблица 4.20

Фильтры	G4	M6	3V-600 E10
Количество фильтров	540	537	537
Материал	Синтетика	Стекловолокно	Стекловолокно
Размеры, мм	592×592×98	588×588×129	592×592×600
Площадь фильтрации, кв. м	2,5	11,8	45,3
Расход воздуха, м ³ /ч	3727	3747,8	3747,8
Начальный ΔР, Па	63	93	118
Конечный ΔР, Па	400	450	128/ 219*
Срок службы, 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.

фильтра. Запатентованная конструкция фильтра обеспечивает его оптимальные эксплуатационные характеристики, низкий перепад давления и увеличенный срок службы.

Использование новых фильтр-элементов увеличило площадь фильтрации альтернативной системы очистки циклового воздуха ГТУ (59,6 кв. м) по сравнению с базовой на 36,1 кв. м, 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 450 Па), а для фильтра средней очистки (ФСО) M6 – 450 Па. Жизненный цикл предложенной системы фильтрации рассчитывался в течение трех лет эксплуатации ГТУ.

На рис. 4.46а и в 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.

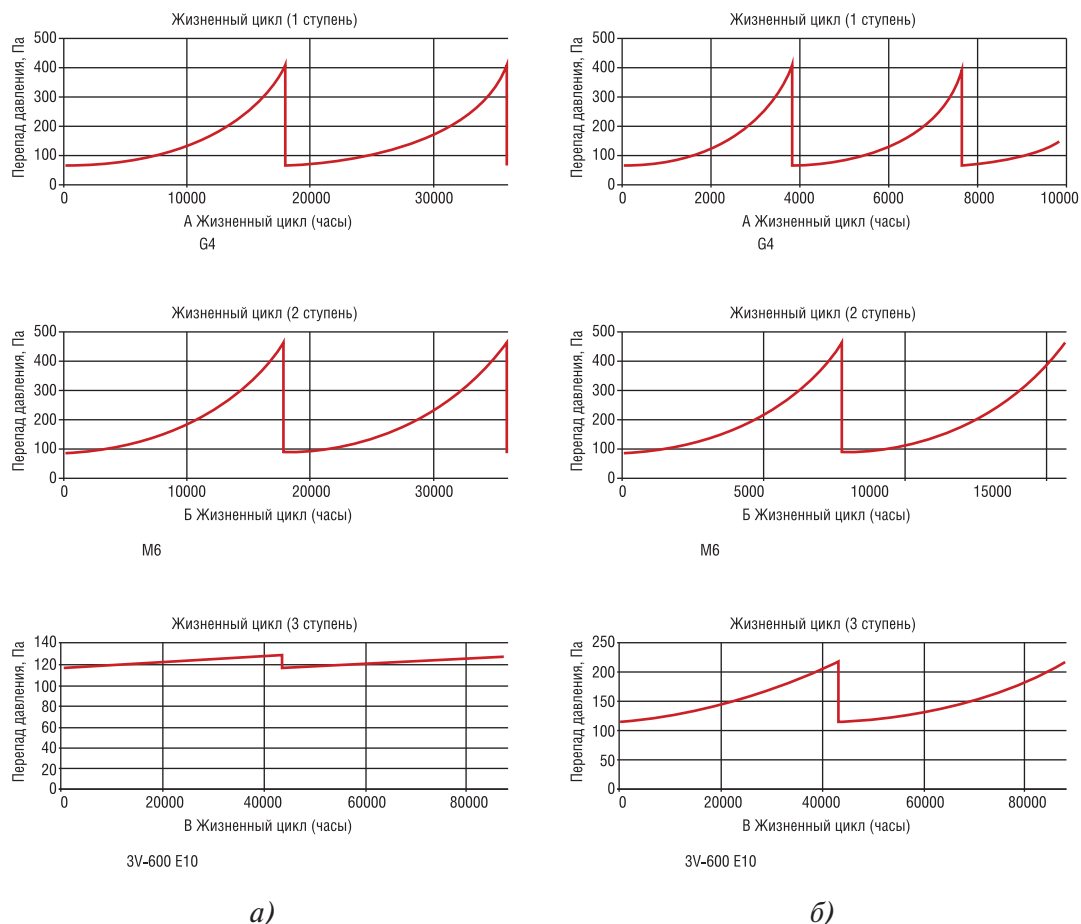


Рис. 4.46. График жизненного цикла фильтров первой ступени класса G4, второй ступени класса M6 и третьей ступени 3V-600 новой системы очистки циклового воздуха ГТУ для условий: а) сельской местности, б) в экстремальных условиях (пожаров)

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 три года эксплуатации, ФСО класса M6 – 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 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. 4.466 и в табл. 4.20 (коричневый цвет) представлены результаты расчета ЖЦ фильтров первой, второй и третьей ступени новой системы очистки циклового воздуха ГТУ для экстремальных внешних условий. В данном случае жизненный цикл фильтра-коагулятора класса G4 ограничился 3900 часами, и потребуются две замены фильтров в год. 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 останутся неизменными. 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.

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 по предложенной методике оценки затрат расчеты отчетливо показывают преимущество новой системы фильтрации циклового воздуха ГТУ по сравнению с базовой.

Резюме

1. Оптимальную систему фильтрации циклового воздуха необходимо выбирать 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 E с глубиной 600 мм позволит увеличить площадь фильтрации и срок службы по сравнению с типоразмерами фильтр-элементов меньших габаритов.

4.11. Технические требования к воздушным фильтрам КВОУ энергетических ГТУ

В главе 1 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 то же время отечественный стандарт действует, и по его требованиям поставляются воздушные фильтры на КВОУ энергетических ГТУ, хотя ГОСТ классифицирует фильтр-элементы общего назначения.

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.

Некоторые компании сейчас 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 искусственного расширения диапазона и срока их службы. Теперь у таких компаний появляется дополнительная возможность делать то же самое, но уже в сторону увеличения этого значения, опираясь на новый 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 назвать 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 приобретенных воздушных фильтров 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 $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ с относительной влажностью $(45 \pm 10)\%$. Так, в климатической зоне Москвы («У») в течение года температура воздуха может изменяться в диапазоне от -45 до $+40^\circ\text{C}$, а относительная влажность достигать 100 %.

Какие же требования предъявляются этими стандартами к воздушным фильтрам для общей вентиляции?

Общие требования:

– фильтрующий элемент должен быть спроектирован или маркирован по направлению потока воздуха так, чтобы предотвратить неправильный монтаж;

– фильтр должен быть спроектирован таким образом, чтобы не возникло утечки 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]. Стандарт распространяется на все виды машин, приборов и других технических изделий и устанавливает макроклиматическое районирование земного шара, исполнения, категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования изделий в части воздействия климатических факторов внешней среды. Все требования стандарта являются обязательными (за исключением рекомендуемых или допускаемых) как относящиеся к требованиям безопасности.

Мы задали читателям простой, но очень важный вопрос: почему на энергетических объектах используются воздушные фильтры общего назначения? Разве технические требования, предъявляемые к таким фильтрам, сопоставимы с требованиями к энергетическому оборудованию, используемому на стратегических объектах, какими являются 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» контроля выполнения этих требований не стало. По прошествии 16 лет с момента создания этого документа можно констатировать, что заложенные в нем основные положения актуальны и сейчас. Уже тогда авторы предлагали использовать в системах фильтрации циклового воздуха ГТУ НЕРА-фильтры класса очистки Н10–Н12 (сейчас 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 [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 параметры 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 (ЕСС), чем меньше начальный перепад давления фильтр-элемента, тем большей энергоэффективностью он обладает (§ 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. Необходимо также помнить, что увеличение перепада давления

на фильтрах КВОУ на 50 Па приводит к снижению выработки электроэнергии ГТУ в среднем на 0,1 %.

Значение начального перепада давления напрямую связано с расходом воздуха. В рассмотренных стандартах фильтр-элементы тестируются 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, 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 перепады 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 в отношении 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 9HA01, работающей в Казани, 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 по техническим и экономическим соображениям неприемлем энергетическим компаниям с ГТУ. Поэтому, несмотря на рекомендации производителей воздушных фильтров, энергетические компании сами должны назначать предельные перепады давления для фильтров каждой ступени фильтрации циклового воздуха, исходя из ограничительных характеристик ГТУ.

Авторы считают целесообразным определить для трехступенчатой системы фильтрации 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 сетке. В совокупности эти устройства в чистом состоянии имеют перепад давления порядка 100 Па. Таким образом, фактически будет достигнута уставка предупредительной сигнализации в 1300 Па.

Для ГТУ GE 9HA01, работающей в Казани и 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 ориентируемся 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 глу-

биной 600 мм и площадью фильтрации 45–50 кв. м. Как показал опыт эксплуатации систем очистки воздуха с такими фильтрами шведской компании С и немецкой компании FAIST AIS на электростанциях в различных климатических условиях, срок службы фильтров может достигать 3–4 лет. Результаты расчетов ЖЦ фильтров с глубиной 600 мм, выполненных нами для сельскохозяйственной местности и экстремальных условий пожаров, показали, что срок службы таких фильтров может составить пять 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 AIS без привязки к температурным условиям эксплуатации настоятельно рекомендует использовать фильтры тонкой очистки с давлением на разрыв более 6000 Па как в сухом, так и в смоченном состоянии. Согласно требованиям 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, увеличивал их перепад давления и снижал 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 может 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 Siemens AG [38] был выпущен в 2005 г. В 2010 г. появился бюллетень Siemens AB [24], рекомендуемый 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 в мокром (100 % влажности) состоянии 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 (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 КВОУ 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], основанный на стандарте CEN/TC 248 «Текс-

тиль и текстильные изделия» Международной организации по стандартизации (ISO). 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 заливаемой 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. Сравнение тестов воздушных фильтров по определению времени 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 заполняют водой все V-образные секции фильтра на 100 % в отличие от компании FAIST AIS, требующей наполнения водой только 86–87 % уровня V-образной секции фильтров. Следовательно, сравнение водостойкости воздушных фильтров даже одного типоразмера, выполненное по этим методикам, также невозможно из-за разной величины гидростатического давления, создаваемого в V-образных секциях фильтров.

Недостатками 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;
- неодновременное 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, что влияет 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 и при 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 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, в методике как 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 Гидрометцентра РФ по среднему количеству осадков в Москве за 30 лет (рис. 4.47 и табл. 4.21) [54]. Согласно этим данным, среднегодовое количество осадков в нашем регионе составляет 691 мм, при этом самым сухим месяцем в году считается март, а самым дождливым — июль.

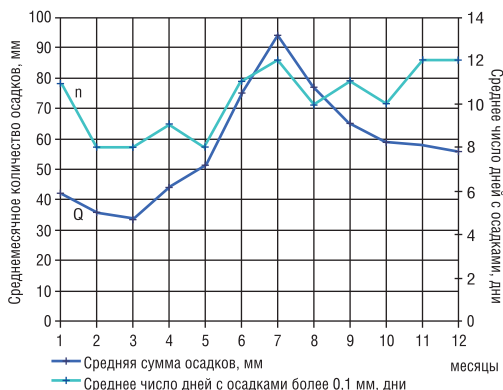


Рис. 4.47. Среднее количество осадков за 30 лет в Москве по данным Гидрометцентра

Среднее количество осадков в Москве за 30 лет (<http://meteoinfo.ru>) Таблица 4.21

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

Аналогичные данные по количеству осадков в 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).

Следует отметить, что метеорологи различают два понятия: высота снежного покрова и количество выпавших осадков. Согласно метеорологическому наставлению, 1 мм осадков численно равен 1 л воды, выпавшей на площадь 1 кв. м ($л/м^2$), или с учетом плотности воды — $кг/м^2$. 1 мм выпавших осадков приравнивается к 1–1,5 см 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. Площадь, 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 нужно 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 расчета дождевого стока и гидравлического расчета коллекторов. Даны таблицы ординат кривых редукиции относительных (отнесенных к суточному слою осадков) интенсивностей для 201 дождевого района, таблицы расчетных 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 № 1). Этот 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 $q_{20} = 80$ л/с 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 с этим стандартом Москва относится к умеренному климату («У»). Пункт 3.9 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).

Интенсивности и продолжительность дождя в районах с умеренным и холодным климатом**Таблица 4.22**

Интенсивность дождя, мм/мин (приложение 5 ГОСТ 15150-69)	Продолжительность дождя (приложение 5 ГОСТ 15150-69)	Расчетное количество воды, выпавшей с дождем на 1 кв. м площади, л
3	5 минут подряд (1–2 раза в 1–2 года)	15 (1 раз в 1–2 года)
1,5	1 час подряд	90
0,5	5 часов подряд	150

Из 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 тестировать фильтр гидростатическим давлением, наполняя водой все V-образные секции. Выполненные нами исследования по тестированию воздушных фильтров тонкой очистки различных производителей на предмет определения их водостойкости показали, что в образец размерами 592×592×292 мм с четырьмя V-образными секциями помещается 36,4 л воды, а в такой же ФТО, но габаритами 592×592×440 мм – 72 литра. Этим объемам воды соответствует 100 %-ное заполнение всех V-образных секций фильтров (см. главу 3). При этом эффективная площадь фильтрации первого фильтра равнялась 19,4 кв. м, а второго – 30,8 кв. м. 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 кв. м площади. Для ФТО размером 592×592×292 мм эта величина равна 1,88 л/м², а для фильтра 592×592×440 мм – 2,34 л/м².

Сравнивая эти величины со значениями, приведенными в *табл. 4.22*, приходим к выводу, что даже 100 %-ное заполнение фильтров тонкой очистки водой не совпадает ни с одним из трех значений расчетного количества воды, выпавшей в виде дождя на 1 кв. м площади. Другое дело, что при соответствующем оснащении лабораторного стенда можно заполнить воздушный фильтр максимальным количеством воды быстрее 5 минут для интенсивности дождя 3 мм/мин. Так, полное заполнение водой ФТО размерами 592×592×292 мм на одном стенде было выполнено за 3 минуты 2 секунды, на другом – фильтр габаритами 592×592×440 мм заполнили за 48 секунд.

Таким образом, меняя интенсивность заполнения водой воздушных фильтров, можно моделировать количество воды, поступающей на 1 кв. м площади. Например, для ФТО габаритами 592×592×440 мм интенсивность заполнения фильтра 72 л воды за 48 секунд соответствует 450 л за 5 минут. Или с учетом эффективной площади фильтрации этого образца 30,8 кв. м получаем количество воды, выпавшей на 1 кв. м площади, равное 14,6 л, что практически совпадает со значением 15 л, приведенным в *табл. 4.22* для интенсивности дождя 3 мм/мин в течение 5 минут подряд.

Описанная процедура тестирования воздушного фильтра на водостойкость представляет собой не что 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 распылом воды через форсунки. Этим методом 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 трех 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, чтобы создавалось 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 на воздушные фильтры воды 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 первая 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 первая капля влаги.

Климатические испытания

Целью климатических испытаний является подтверждение начального перепада давления и эффективности воздушного фильтра до и после нахождения фильтра тонкой очистки в течение некоторого времени при температуре и влажности, соответствующей конкретному макроклиматическому району эксплуатации изделия согласно ГОСТ 15150-69. Эти испытания проводятся 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 проводиться 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 струйкой (масляной нитью) и определение их водостойкости.

Резюме

Применительно к воздушным фильтрам для КВОУ ГТУ требования ГОСТ 15150-69 можно сформулировать следующим образом:

1. 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.

2. Фильтр-элемент должен быть изготовлен из материала, позволяющего выдерживать воздействие температуры, влажности и агрессивной среды, при которых ему предстоит эксплуатация. 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 аттестованных лабораториях.

3. Пластмассовые элементы воздушных фильтров и боксов комбинированных систем фильтрации должны быть изготовлены из высокопрочного АБС-пластика. Пластмассовые изделия не должны деформироваться под воздействием усилий, возникающих при нормальных условиях эксплуатации. Твердость пластмассовых изделий должна проверяться с помощью твердомера (дюрометра) по Шору тип D или по Роквеллу.

4. Во избежание протечек грязного воздуха и влаги через место установки фильтр-элементов в КВОУ на их рамках должны быть установлены бесшовные упругие уплотнения (прокладки); твердость резиновых изделий (прокладок) и мягких пластмасс определяется с помощью дюрометра по Шору тип А.

5. Во избежание протечек грязного воздуха и влаги стыки фильтровального материала и рамки фильтра должны быть надежно герметизированы.

6. Для проверки эффективности и начального перепада давления фильтр-элементы должны тестироваться на испытательных стендах независимых институтов или в аттестованных лабораториях.

7. 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 выходе.

8. Для проверки водостойкости фильтр-элементы должны подвергаться статическому и динамическому тестированию на испытательных стендах независимых институтов или в аттестованных лабораториях.

9. В процессе тестирования на водостойкость количество подаваемой воды в фильтр-элемент должно соответствовать макроклиматической зоне эксплуатации ГТУ, что должно быть указано в протоколе испытаний.

10. Для уменьшения проникновения пыли и влаги карманы фильтров должны быть спаяны, а не прошиты, и снабжены фиксаторами для предотвращения их слипания.

11. 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.

12. Карманные фильтры не должны устанавливаться в качестве финальных фильтров в КВОУ ГТУ.

13. Фильтры-коагуляторы должны иметь дренаж, отводящий атмосферную влагу в сторону грязного воздуха.

14. Кассетные фильтры в зависимости от места их установки должны иметь дренажные канавки, отводящие влагу на сторону грязного воздуха.

15. Все фильтр-элементы должны соответствовать требуемому по месту эксплуатации классу пожаробезопасности;

16. 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 воздушных фильтров для КВОУ ГТУ

Техническое задание (ТЗ) на приобретение воздушных фильтров для КВОУ ГТУ является первостепенным документом энергетических компаний для закупки качественной, эффективной и климатически 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 результатов эксплуатации энергетических ГТУ, приведенные нами в книге, 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 фильтр-элементы глубиной 600 мм, значит, несмотря на техническую и экономическую целесообразность для электростанции, 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 немало.

Здесь речь пойдет о тех, кто в процессе закупочной процедуры честно стремится оснастить КВОУ надежной и эффективной системой очистки циклового воздуха энергетических ГТУ.

Первоначально нужно понять, каков уровень загрязненности окружающей среды *именно на всае КВОУ каждой ГТУ*. Для этого необходимо

организовать мониторинг окружающей среды на месте размещения КВОУ. Затем проанализируйте эффективность ранее установленных фильтров замером загрязненности циклового воздуха ГТУ перед и за фильтрами с помощью счетчиков частиц. Для этого потребуется проведение организационно-технических мероприятий по закупке счетчиков частиц и обучение 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 ответственный за сбор информации и анализ загрязнения воздуха на всасе КВОУ ГТУ. В 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 будет заявлять, что только при закупке у него *фильтров для всех ступеней КВОУ* он может гарантировать их надежную работу. Это не что 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: климатических испытаний (температура, влажность), давления на разрыв в сухом и влажном состоянии, на водостойкость. В случае поставки продукции дистрибьютором компании, **обязательно** проверьте соответствие технических характеристик, указанных в паспортах фильтр-элементов, данным, представленным на официальном сайте головного офиса.

Не выставляйте излишних, завышенных требований по климатическим испытаниям, как это сделала ТЭЦ в районе Сочи, затребовав ре-

зультаты тестов фильтров при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Пожалуйста, помните, что каждый тест стоит денег и порой немалых. Запрашивать новые («свежие») тесты необходимо в случае отмены одних и введения в действие других ГОСТ, новых моделей фильтров или изменения условий эксплуатации ГТУ. Например, изготовления фильтров по программе импортозамещения или локализации производства в нашей стране для иностранных поставщиков. 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 проводили *специальную (тщательную) подготовку* фильтр-элемента для тестирования в независимой лаборатории. После получения положительного результата контроль изготовления фильтров на конвейере ослабевал. Особенно это касается отдельных дистрибьюторов иностранных компаний, занимающихся *сборочным производством* 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 путем 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 антиобледенительную 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. В этом случае 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 турбиной, целесообразно дать шанс обоим поставщикам. Установите их фильтры на рядом стоящие КВОУ и проанализируйте, какие результаты будут получены в течение одного года эксплуатации.

Еще проще обстоит дело, когда на ТЭЦ два рядом стоящих энергоблока ПГУ. Четыре КВОУ позволят 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 уверовав в свою исключительность, снижает контроль продукции и теряет свой статус.

Заинтересованный поставщик воздушных фильтров не теряет интерес к объекту поставки сразу по завершении 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 неправомерно.* 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 on-line промывки ГТУ делать больше не надо, не соответствует действительности! Промывки как делались, 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 проводились четыре 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 дистрибьюторами запад-

ных компаний. Эффективность предлагаемых ими фильтров существует 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 области 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 on-line промывок и одной off-line промывки в течение года. Если в процессе эксплуатации будет наблюдаться деградация характеристик ГТУ и потребуется промывка компрессора, то поставщик фильтров должен будет компенсировать затраты на моющее 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 руками представителей поставщика снимать и устанавливать фильтры в КВОУ, поддерживать чистоту и порядок, 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 электрооборудованием, знаний инструкций по эксплуатации и планово-предупредительных ремонтов оборудования, промывки ГТУ. В таких компаниях обычно есть только менеджеры по продажам, не обладающие соответствующими знаниями и навыками. Поэтому компания продавца фильтров нанимает субрядчика, имеющего такие допуски и знания, который и проводит 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. Неслучайно 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 немногим 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 Микророг и публикуются с ее разрешения (рис. 4.49–4.54).

На рис. 4.51 показано крепление защитных пластмассовых решеток в кассетных фильтрах.

Благодаря такой защитной решетке кассетные фильтры компании Микророг выдерживают давление на разрыв более 6000 Па в сухом и влажном состоянии.



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



а)



б)

Рис. 4.51. Крепление защитных пластмассовых решеток в кассетных фильтрах: а) с одной стороны; б) с обеих сторон

Для реверсной установки карманных фильтров перед кассетными фильтрами целесообразно использовать фильтр-элемент, изображенный на рис. 4.52.

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).

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).

По периметру рамки фильтра предварительной очистки уставлена бесшовная полиуретановая уплотнительная прокладка, обеспечиваю-



а)



б)

Рис. 4.52. Карманный фильтр для реверсной установки: а) фронтальный вид; б) вид сверху



Рис. 4.53. Крепление карманного фильтра к кассетному

щя герметичность прилегания 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 ячейке КВОУ ГТУ. **Обращаем внимание на тот факт**, что количество и размеры V-образных секций кассетных фильтров предварительной и финишной очистки воздуха совпадают друг с 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



а)



б)

Рис. 4.54. Реверсное крепление кассетных фильтров: а) внешний вид; б) фиксация

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 здании. Назвать эту лабораторию независимой мы не имеем морального права.

Назрела острая необходимость создания в энергетической области действительно независимой лаборатории тестирования 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.

Антуан де Сент-Экзюпери, «Маленький принц»

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. Маскрофт Ф. 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). Уч. пособие / Под ред. д. т. н., проф., акад. МАНЭБ и АТП РФ А. Г. Ветошкина — Пенза: Изд-во Пензенского технологического института, 2004.

12. Muscroft F. 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. Голов П. В., Жохов В. Л., Ленев С. Н. Новый глобальный стандарт для тестирования и оценки воздушных фильтров ISO 16890 // Газотурбинные технологии. – 2017. – № 5. – С. 28–31.

18. ГОСТ Р 70064.1-2022 «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/33VNqx>
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 РАН по проблемам газовых турбин. – 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-chego-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 КВОУ 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. Ртищевская краеведческая энциклопедия. <https://clck.ru/33YLCV>

Глава 3

1. Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок. – ОАО 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. – 2014. – № 4. – 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. – М.: ИПК Издательство стандартов.

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 КБОУ 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», утвержден 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 КБОУ ГТУ // Газотурбинные технологии. – 2017. – № 6. – С. 28–32.
27. Жохов В. Л., Ленев С. Н. Анализ применения фильтров-коагуляторов на КБОУ 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 КБОУ 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 материала // 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. Muscroft F. 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. Muscroft F. The operation cost of gas turbine combustion air filters. Report 2004, 62 pp.
15. Маскрофт Ф. 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. – С. 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 Изд-во ОмГТУ, 2010. – 61 с.

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. Голов П. В., Жохов В. Л., Ленев С. Н. 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. 600 mm 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. 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 недопроизводство 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», 2008 (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 Гидрометцентра 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 РФ, 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 РФ, 2012.



Фрэнк Маскрофт и В. Л. Жохов

Фрэнк Маскрофт – австралийский эксперт в области систем фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ, автор большого количества публикаций во многих странах. В начале XXI века входил в группу разработчиков концепции применения высокоэффективных систем фильтрации на энергетических ГТУ. Принимал участие в программе испытаний НЕРА-фильтров на электростанции в Фрипорте (Техас, США), где была построена экспериментальная ГТУ. В основу программы испытаний была положена идея о том, что потеря мощности ГТУ происходила из-за низкой эффективности стандартных систем фильтрации того времени.

Ф. Маскрофт внес заметный вклад и в применение эффективных систем фильтрации в отечественной энергетике. В 2004 году в Москве на выставке «Нефть и газ» он выступил с докладом «Эксплуатационная стоимость воздушных фильтров для газовых турбин». Его выступление вызвало большой интерес специалистов, поскольку именно тогда в нашей стране началось интенсивное строительство энергоблоков ПГУ на электростанциях. В журнале «Газотурбинные технологии» Ф. Маскрофт в разные годы опубликовал несколько своих статей: «Влияние системы фильтрации на эксплуатационные расходы», «Статические и импульсные фильтры. Какие лучше?» и др.

С Фрэнком Маскрофтом меня связывают долгие годы дружбы и плодотворного сотрудничества. Его ценные советы позволили нам более эффективно внедрять высокоэффективные фильтры на КВОУ отечественных энергетических компаний.

В. Л. Жохов



ООО «Элба Фильтр Мануфактуринг Рус» — это надёжный партнёр для предприятий, которые нуждаются в высококачественных фильтрах для систем фильтрации газотурбинных установок (ГТУ).



Компания на протяжении 14 лет является официальным представителем компании Mikropor (Турция) в России и СНГ, а также имеет своё производство воздушных фильтров для разных областей промышленности, над улучшением качества которого идёт ежедневная работа.

ООО «Элба Фильтр Мануфактуринг Рус» предлагает полный комплект решений, начиная от диагностики потребности, изготовления, поставки и заканчивая сервисным обслуживанием в период эксплуатации.

В соответствии с ISO 29461-1:2021 в комплексные воздухоочистительные устройства для ГТУ предлагаем фильтры классов Т4-Т13:



материал: синтетика
рамка: пластик (ABS),
оцинкованная сталь,
нержавеющая
сталь



материал: синтетика
рамка: литая пластиковая



материал: микростекловолокно
рамка: полистирол



материал: активированный
слой
рамка: пластик (PS)

Мы предлагаем энергоэффективные фильтры класса А+, прошедшие сертификацию в Eurovent по стандарту ISO 16890-1:2016, панельные, кассетные и карманные фильтры очистки воздуха общего назначения (ГОСТ Р ЕН 779-2014) классов G4-F9, а также высокоэффективные фильтры очистки воздуха EPA, HEPA и ULPA (ГОСТ Р ЕН 1822-1-2010):



материал: синтетика
рамка: оцинкованная сталь



материал: синтетика
рамка: полистирол



материал: микростекловолокно
рамка: оцинкованная сталь,
алюминий, нержавеющая
сталь, МДФ, пластик

Контакты: 123007, г. Москва, ул. 5-я Магистральная, д. 14, строение 1, офис 53

☎ +7 (495) 627-65-43, +7 (495) 627 65 49

✉ elbafilter@elbafilter.ru

Жохов Владимир Леонидович,
Аккайя Бюлент

**ВОЗДУШНЫЕ ФИЛЬТРЫ
ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГТУ**

Компьютерная верстка *Одинцова И. А.*
Корректор *Смирнов В. В.*

Подписано в печать 04.08.23 г. Формат 70×100/16.
Бумага офсетная. Гарнитура NewtonС.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 27,3.
Тираж 300 экз. Заказ № 00000/23.

ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии»
Россия, 152901, Ярославская обл., г. Рыбинск,
ул. Ломоносова, д. 30а
Тел.: (4855) 295-235, 295-236
E-mail: info@gtt.ru. www.gtt.ru

Отпечатано в типографии
ООО «Тверской печатный двор»
Россия, 170518, Тверская обл.,
Калининский р-н, с. Никольское, д. 26

ISBN 978-5-6045651-1-7



9 785604 565117 >



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 >