Жохов В. Л., Аккайа Б.

Воздухозаборные тракты энергетических ГТУ

Рыбинск
ИД «Газотурбинные технологии»
2023

УДК 62-733
ББК 31.16
Ж82

Жохов В. Л., Аккайа Б.

Ж82 Воздухозаборные тракты энергетических ГТУ. — Рыбинск, ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2023. — 240 с.
ISBN 978-5-6045651-3-1

В книге представлены результаты многолетних исследований воздухозаборных трактов энергетических ГТУ, выполненные авторами в различных регионах нашей страны и за рубежом. Показаны результаты разработанной системы мониторинга загрязнения циклового воздуха энергетических ГТУ и воздушных фильтров КВОУ ПАО «Мосэнерго». На базе выполненных исследований по инициативе и непосредственном участии В. Л. Жохова был создан руководящий документ «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок» РАО «ЕЭС России».

Авторы выражают благодарность директору ГЭС-1 им. П. Г. Смидовича ПАО «Мосэнерго» О. А. Савельеву за помощь в организации исследований КВОУ и воздушных фильтров на Калининградской ТЭЦ-2 и Сочинской ТЭС и заместителю управляющего директора – главному инженеру ПАО «Мосэнерго» С. Н. Ленёву за многолетнюю помощь при проведении исследований воздухозаборных трактов энергетических ГТУ.

УДК 62-733
ББК 31.16

ISBN 978-5-6045651-3-1

© В. Л. Жохов, Б. Аккайа, 2023
© ИД «Газотурбинные технологии», 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 5
Введение 7
Глава 1. Ошибки поставщиков ВЗТ для ГТУ отечественных ТЭЦ (историческая справка) 9
1.1. Опыт эксплуатации КВОУ на Калининградской ТЭЦ-2 9
1.2. Новые воздухоприемные устройства ГТЭ-160 на Калининградской ТЭЦ-2 18
1.3. Изготовление ВЗТ ГТЭ-110 для Ивановских ПГУ 26
1.4. Выбор ВЗТ для энергетических ГТУ «Мосэнерго» 35
Глава 2. Требования к ВЗТ для энергетических ГТУ отечественных ТЭЦ 42
2.1. Погодные козырьки КВОУ ГТУ 42
2.1.1 Моделирование течения воздушного потока в погодных козырьках КВОУ ГТУ 47
2.1.2. Концепции выбора погодных козырьков 57
2.2. Противомоскитные сетки 65
2.3. Защитные сетки от птиц и мусора 79
2.4. Антиобледенительная система КВОУ ГТУ 98
2.5. Системы охлаждения циклового воздуха ГТУ 107
Глава 3. Системы фильтрации циклового воздуха ГТУ 116
3.1. Импульсные системы очистки воздуха энергетических ГТУ 117
3.2. Статические системы очистки воздуха энергетических ГТУ 124
3.3. Конструкция воздухозаборного тракта энергетической ГТУ 129
Глава 4. Мониторинг атмосферного воздуха и воздушных фильтров КВОУ ГТУ ПАО «Мосэнерго» 149
4.1. Цели мониторинга окружающей среды на ТЭЦ с ГТУ 149
4.2. Мониторинг влияния слоистости приземного слоя тропосферы на воздушные фильтры КВОУ ГТУ 151
4.3. Влияние лесных пожаров 2010 года на работу фильтров КВОУ ГТУ 159
4.4. Мониторинг влияния красноярских пожаров в июле 2016 года на работу КВОУ ГТУ ПАО «Мосэнерго» 162
4.5. Рейтинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ 166
4.5.1. О целесообразности выполнения замеров на всех ТЭЦ в одно и то же время 166
4.5.2. Методика определения рейтинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ 169
4.5.3. Влияние выбора систем фильтрации КВОУ на работу ГТУ 173
4.6. Модернизация КВОУ энергетических ГТУ с целью качественного мониторинга загрязненности воздушных фильтров по перепадам давления 184

Глава 5. Влияние проектных решений на условия эксплуатации КВОУ ГТУ 190
5.1. Анализ проектного решения по размещению ВЗТ для ГТУ..... 190
5.2. Причины различия в условиях эксплуатации рядом стоящих КВОУ ГТУ с односторонним всасом циклового воздуха..... 198
5.3. Влияние проектного решения на эксплуатацию рядом стоящих ВЗТ ГТУ с трехсторонним всасом циклового воздуха 204
5.4. Влияние конструкции ВЗТ ГТУ на систему фильтрации воздуха в КВОУ 214
5.5. Здравый смысл проектных решений по снижению рисков загрязнения систем фильтрации ВЗТ энергетических ГТУ оборудованием энергоблоков ПГУ 219
Заключение 228
Список литературы по главам 232

Предисловие

В предисловии к новой книге В. Л. Жохова, посвященной воздухозаборным трактам (ВЗТ) энергетических ГТУ, я хотел бы сказать несколько слов о его неоценимой помощи, оказанной нам в 2006–2007 годах на Калининградской ТЭЦ-2 при приемке и опытной эксплуатации системы фильтрации циклового воздуха ГТЭ-160. Опыта обслуживания оборудования новых парогазовых установок (ПГУ) с газотурбинными установками (ГТУ) на электростанции в то время никто не имел. Учились на ходу, в процессе приемки и освоения новой техники. С системой очистки воздуха для ГТУ мы столкнулись впервые.

Поставщиком двух ВЗТ на первый энергоблок Калининградской ТЭЦ-2 было ЗАО «ЦКТИ-ПГУ». В первые месяцы эксплуатации этого оборудования мы заметили резкий рост давления на фильтрах комплексного воздухоочистительного устройства (КВОУ) ГТУ. В результате обе ГТУ не могли выйти на номинальный режим и обеспечить необходимую выработку электроэнергии. Замена фильтров на новый комплект аналогичных фильтров не дала положительного результата.

Для выяснения причин такого экстремального роста давления в системе очистки циклового воздуха ГТУ мы пригласили В. Л. Жохова. Владимир Леонидович совместно со мной и С. Н. Леневым провел доскональное обследование системы фильтрации воздуха, противообледенительной системы (ПОС) КВОУ, глушителей шума, воздуховодов ВЗТ. Были взяты образцы металла в различных местах ВЗТ, и в химической лаборатории электростанции выполнены анализы, позволяющие определить марки сталей, примененных для изготовления ВЗТ.

В процессе обследования было установлено:

- для изготовления ВЗТ использована низкокачественная сталь 3;
- отсутствовали погодные козырьки КВОУ;
- неправильно спроектирована ПОС: отсутствовал глушитель шума, разрыв кожуха трубопровода, недостаточная толщина металла;
- нарушен стандарт сварки изделий первой группы, работающих в особо тяжелых условиях – под давлением и при повышенных температурах;
- неправильно выбраны и установлены воздушные фильтры в КВОУ;
- фильтры не соответствуют действующим ГОСТ;
- неправильно установлен шибер в воздуховоде;
- неправильно спроектированы байпасные клапаны;
- повреждены глушители шума КВОУ;
- некачественно окрашены элементы ВЗТ по неподготовленному пескоструйной обработкой металлу.
- отсутствует освещение в КВОУ.

По результатам обследования был составлен акт, согласно которому оба ВЗТ были признаны аварийными и подлежащими замене уже через четыре месяца с начала эксплуатации. Оба ВЗТ были демонтированы.

В 2007 году новым поставщиком двух ВЗТ на первый энергоблок Калининградской ТЭЦ-2 стала американская компания Donaldson. К сожалению, и этот поставщик ВЗТ и воздушных фильтров также допустил ряд конструктивных ошибок. Было зафиксировано повышенное разрежение воздуха на входе в осевой компрессор ГТУ при номинальной нагрузке, в результате чего ГТУ не могли набрать проектную мощность и обеспечить необходимую выработку электроэнергии. И вновь мы обратились к В. Л. Жохову за помощью.

Была подготовлена и внедрена методика мониторинга скорости и давления воздушного потока в воздуховодах ГТУ. В результате обследования ВЗТ, выполненного В. Л. Жоховым совместно со мной, было установлено, что воздухозаборные тракты компании Donaldson имеют проходное сечение в два раза меньше расчетного. Воздушные фильтры не обеспечивали очистку циклового воздуха от атмосферной влаги и двукрылых насекомых. По результатам обследования был составлен акт, согласно которому воздуховоды подлежат замене на новые за счет компании Donaldson. Владимир Леонидович оказал неоценимую помощь в составлении программы испытаний, обследовании ВЗТ и подготовке акта дефектации, приведших к необходимости замены воздуховодов.

В 2013 году я вновь прибегнул к помощи В. Л. Жохова, когда уже был директором Сочинской ТЭС. На КВОУ ГТУ SGT-700 и GT-10C электростанции были установлены не статические воздушные фильтры, как на Калининградской ТЭЦ-2, а импульсные фильтры той же американской компании Donaldson. Меня интересовало, насколько эффективны импульсные фильтры для очистки атмосферного воздуха в районе Сочи. Владимир Леонидович выполнил следующие работы:

- провел рекогносцировку ВЗТ ТЭС в соответствии «розой ветров»;
- обеспечил анализ концентрации взвешенных веществ в атмосферном воздухе ТЭС с определением дисперсного и химического состава загрязнений;
- выявил внешние, наиболее пылеопасные источники загрязнения территории ТЭС.
- определил дисперсный и химический состав взвешенных частиц, поступающих на всас КВОУ ГТУ № 1 и 3;
- определил химический состав отложений на первых ступенях осевого компрессора ГТУ GT-10C;
- обследовал все КВОУ, состояние карманных фильтров системы вентиляции и импульсных фильтров;
- представил результаты мониторинга карманных фильтров класса G4 компании Synsafe и импульсных фильтров класса F9 компании Donaldson, выполненного в специализированной лаборатории.

Работы была выполнены, как всегда, на высоком профессиональном уровне с использованием современных методов и аппаратуры мониторинга окружающей среды и фильтров КВОУ ГТУ. На основании результатов обследований В. Л. Жохов дал заключение об эффективности существующей системы очистки циклового воздуха ГТУ, а также рекомендации по улучшению эффективности и увеличению сроков службы фильтров КВОУ ГТУ Сочинской ТЭС. С учетом рекомендаций в системе вентиляции кожуха ГТУ и КВОУ были установлены карманные и импульсные фильтры повышенного класса фильтрации, которые подтвердили свою эффективность и надежность в эксплуатации.

Теперь, когда я работаю в ПАО «Мосэнерго», мне хорошо известно о той огромной работе, которую проводит В. Л. Жохов по мониторингу загрязненности воздуха на всасе 11 ГТУ энергоблоков ПГУ, входящих в состав общества. Не случайно в 2020 году эксперт В. Л. Жохов был признан лучшим рационализатором ПАО «Мосэнерго».

Хочу пожелать Владимиру Леонидовичу новых творческих успехов в научной и производственной деятельности.

Директор ГЭС-1 им. П. Г. Смидовича ПАО «Мосэнерго»
О. А. Савельев

Введение

Первый энергоблок с ПГУ в России вступил в строй 22.12.2000 на Северо-Западной ТЭЦ в Санкт-Петербурге. В его состав вошли паровая турбина и две ГТУ Siemens V94.2, оснащенные воздухозаборными трактами (ВЗТ) производства компании G+H (Германия). Каждый ВЗТ состоит из комплексного воздухоочистительного устройства (КВОУ), глушителя шума и воздуховодов. ВЗТ этой компании также оборудована ГТУ Siemens V94.2 на Дзержинской ТЭЦ ОАО «ТГК-6».

Опыт эксплуатации Северо-Западной ТЭЦ (сейчас ОАО «Интер РАО ЕЭС») показал недостатки конструкции КВОУ и воздушных фильтров. Несмотря на это, на втором энергоблоке Северо-Западной ТЭЦ были также установлены два ВЗТ устаревшей конструкции компании G+H. Сейчас на перечисленных ТЭЦ эксплуатируются пять ВЗТ компании G+H.

Поставщиком ВЗТ на первый энергоблок Калининградской ТЭЦ-2 (в настоящее время ОАО «Интер РАО ЕЭС»), Тюменской ТЭЦ-1 ОАО «Тюменьэнерго» и ТЭЦ-28 ОАО «Мосэнерго» было ЗАО «ЦКТИ-ПГУ». Как выяснилось в процессе эксплуатации, все эти ВЗТ обладали большим количеством конструктивных недостатков, неправильным выбором и установкой воздушных фильтров, отсутствием погодных козырьков.

В 2006 году было проведено обследование и составлен акт о техническом состоянии двух ВЗТ Калининградской ТЭЦ-2, согласно которому они были признаны аварийными и подлежащими замене уже через четыре месяца с начала эксплуатации. Поставщиком двух новых ВЗТ на первый энергоблок Калининградской ТЭЦ-2 стала американская компания Donaldson. К сожалению, и этот поставщик ВЗТ и воздушных фильтров также допустил ряд конструктивных ошибок, приведших к необходимости замены воздуховодов. В дальнейшем Калининградская ТЭЦ-2 отказалась заказывать ВЗТ этой компании для своего второго энергоблока.

ТЭЦ-28 уже длительное время не функционирует, оборудование демонтировано.

НПО «ЦКТИ им. И. И. Ползунова» изготовило и поставило один ВЗТ для ГТЭ-65 на ТЭЦ-9 ОАО «Мосэнерго», четыре ВЗТ для ГТЭ-110 на Ивановской ГРЭС филиала «Ивановские ПГУ» ОАО «Интер РАО ЕЭС» и ВЗТ для ГТЭ-110 на ГРЭС-24 ОАО «ОГК-6» в Новомичуринске.

Поставщиком четырех ВЗТ на ТЭЦ-27 и двух ВЗТ на ТЭЦ-21 ОАО «Мосэнерго» стала российская компания ООО «Энстром» в коалиции со шведской Camfil Farr.

Опыт эксплуатации ВЗТ на ТЭЦ-27 и ТЭЦ-21 зимой 2009 года выявил конструктивные недостатки антиобледенительной системы КВОУ, приведшие к появлению льда на фильтрах-коагуляторах и повреждению фильтров грубой очистки. Эти проблемы вызвали неплановые остановы ГТЭ-160 энергоблоков, что привело к снижению выработки электроэнергии и тепла в зимний период.

Кроме того, на ТЭЦ-21 в проточную часть одного из ГТЭ-160 ОАО «Силовые машины» попал посторонний предмет из ВЗТ, который повредил лопатки первой, третьей и десятой ступеней осевого компрессора, что привело к длительной остановке ГТЭ для ремонта лопаток ротора компрессора.

Несмотря на эти инциденты, на второй энергоблок Калининградской ТЭЦ-2, а также на ТЭЦ-22, ТЭЦ-5 ОАО «ТГК-1» и Уфимскую ТЭЦ-5 ОАО «Башкирэнерго» были поставлены ВЗТ производства ООО «Энстром» совместно с Camfil Farr.

Поставщиком ВЗТ для ГТУ Alstom GT-26 на ТЭЦ-26 ОАО «Мосэнерго» стала компания BIS Gerber (Бремен, Германия), которая являлась долгосрочным партнером ведущих производителей ГТУ Siemens AG и Alstom (General Electric).

В ряде тендеров на поставку ВЗТ для отечественных ТЭЦ участвовала голландская компания Merrem la Porte, представившая ряд интересных технических решений, исключающих обледенение воздушных фильтров. ВЗТ этой компании успешно эксплуатируются в России на объектах компании Sulym Petroleum Development.

В дальнейшем производителями ВЗТ для энергетических ГТУ компаний Siemens AG (ФРГ) и Siemens AB (Швеция) на отечественные ТЭЦ и ТЭС стали компании FAIST AIS (ФРГ) и Camfil Farr (Швеция). Ими поставлены ВЗТ для ГТУ на ТЭЦ-16 и ТЭЦ-20 (ПАО «Мосэнерго»), Адлерской и Грозненской ТЭС (ПАО «ОГК-2») и др.

Анализ состояния ВЗТ на российских ТЭЦ впервые был представлен Жоховым В.Л. на Штабе по надежности ОАО РАО «ЕЭС России» в октябре 2006 года. Этот анализ производился на основе действовавших в то время ГОСТов и Технических заданий на ВЗТ. Решением Штаба по надежности была создана комиссия по разработке документа «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха энергетических газотурбинных установок». В мае 2007 года этот руководящий документ был утвержден главным инженером ОАО РАО «ЕЭС России» и вступил в силу.

В этом документе:

- определены требования со стороны заказчиков, проектировщиков, изготовителей ГТУ к воздухозаборным трактам;
- установлена ответственность всех сторон от составления технического задания на ВЗТ до сдачи оборудования приемочной комиссии;
- установлен перечень обязательных работ при проектировании, изготовлении и сдаче ВЗТ заказчику;
- определен порядок контроля качества изготовления ВЗТ и состав комиссий по приемке оборудования на объекте;
- разработаны требования по высоте модулей КВОУ, позволяющие снизить трудоемкость, обеспечить механизацию и удобство проведения регламентных работ;
- установлены требования к расходу воздуха через байпасные клапаны КВОУ, позволяющие повысить надежность работы ГТУ;
- сформулированы требования к выбору поставщиков ВЗТ, согласно которым в тендере на поставку оборудования могут участвовать компании, имеющие соответствующие референции;
- разработаны рекомендации по комплектации КВОУ и систем фильтрации ГТУ для различных климатических условий.

В *главе 1* книги приведен анализ конструктивных ошибок ВЗТ ряда поставщиков этого оборудования для ГТУ отечественных ТЭЦ, выполненный на основании требований этого документа.

В *главе 2* рассмотрены устройства, комплектующие КВОУ энергетических ГТУ, в соответствии с документом «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок» РАО ЕЭС России, а также их эксплуатация на действующих энергетических объектах в различных странах и климатических условиях.

В *главе 3* рассмотрены конструктивные особенности различных систем фильтрации циклового воздуха ГТУ и конструкция ВЗТ для энергетической ГТУ со статической системой очистки воздуха КВОУ.

В *главе 4* приведены результаты мониторинга атмосферного воздуха и воздушных фильтров КВОУ ГТУ ПАО «Мосэнерго» в нормальных и экстремальных климатических условиях.

В *главе 5* проанализировано влияния проектных решений на условия эксплуатации КВОУ ГТУ.

Раньше я слушал слова людей и верил в их дела.
Теперь же я слушаю слова людей и смотрю на их дела.

Конфуций

Глава 1
ОШИБКИ ПОСТАВЩИКОВ ВЗТ ДЛЯ ГТУ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТЭЦ (историческая справка)

1.1. Опыт эксплуатации КВОУ на Калининградской ТЭЦ-2

В октябре 2005 года в опытную эксплуатацию был запущен первый энергоблок ПГУ-450 Калининградской ТЭЦ-2. Жители области и РАО «ЕЭС России» связывали большие надежды с пуском этого объекта. Однако не прошло и трех месяцев с начала работы станции, как 12 января 2006 года, входящая в ее состав газотурбинная установка ГТЭ-160 № 11 была остановлена [1]. Причиной этого стало превышение предельно-допустимого перепада давления на фильтрах тонкой очистки (1100 Па) КВОУ. Наработка станции составила всего 1100 часов. На следующий день были заменены 1200 фильтров тонкой очистки (ФТО).

Проработав с момента запуска еще 480 часов, ГТУ была вновь остановлена по той же самой причине. Такая же участь постигла и ГТЭ-160 № 12, входящую в состав энергоблока. Энергоблок остановлен, электроэнергия и тепло не вырабатываются – ТЭЦ понесла огромные убытки. Такими оказались результаты работы ПГУ Калининградской ТЭЦ-2 за первые месяцы эксплуатации нового оборудования (*рис 1.1*).

Выясним первопричины неудовлетворительной работы воздухозаборного тракта, приведшие к остановке ТЭЦ. Любой анализ работы технического устройства должен начинаться с изучения технического задания (ТЗ) на его разработку.

Техническое задание на КВОУ

Согласно ТЗ-515-775-029-02 на разработку, изготовление и поставку данных ВЗТ, конечной целью являлось «создание унифицированного

Рис. 1.1. КВОУ энергоблока Калининградской ТЭЦ-2

устройства в блочном исполнении, соответствующего лучшим образцам ведущих фирм в области воздухоочистки». ВЗТ должен был включать следующие функциональные блоки: воздухоприемный; воздухоподогрева; влагоотделения; фильтров предварительной (грубой) и тонкой очистки; блок байпасных клапанов; блок шумоглушения (двухступенчатый), а также первичные приборы контроля КВОУ и электроприводы, согласованные с автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУ ТП) ГТУ.

Комплексное воздухоочистительное устройство соединяется с входным патрубком компрессора ГТУ воздуховодом, проходящим через машинный зал. В его состав входит шиберная заслонка, сигналы к приводу которой заведены в АСУ ТП ГТУ.

ВЗТ проектировался для стационарной ГТУ в климатическом исполнении «У» категории 1 (ГОСТ 15150-69). Он должен было обеспечивать надежную работу установки в диапазоне температур наружного воздуха –33...+40 °С при относительной влажности до 80 %, концентрации аэрозольных включений до 5 мг/м^3 и среднегодовой запыленности всасываемого воздуха 0,2 мг/м^3.

Концентрация пыли в воздухе после очистки должна быть не более 0,08 мг/м^3, в том числе размером до 2 мкм – не более 0,06 мг/м^3; размером 2...10 мкм – не более 0,02 мг/м^3; свыше 10 мкм – не более 0,0002 мг/м^3.

Перечень оборудования, включенного в состав КВОУ, являлся типовым для того уровня развития данных технологий. Однако обращают на себя внимание жесткие условия по концентрации аэрозольных включений (до 5 мг/м^3) в составе воздуха, поступающего на всас ГТУ. Судя по всему, эти данные взяты из ГОСТ 29328-92. Разработчики не могли не понимать, что такая концентрация включений соответствует пустыне, но тем не менее взяли на себя обязательства по обеспечению надежной работы КВОУ и ГТУ в таких условиях окружающей среды. Даже ГОСТ 29328-92 допускал работу воздухоочистительных устройств в подобных условиях не более 100 часов в году – в данном ТЗ ограничений по времени нет. Предлагать для таких природных условий статические фильтры не имеет смысла – здесь необходима система импульсной очистки. Данный факт ставит под сомнение профессионализм разработчиков этого ВЗТ.

Другое дело, соответствуют ли требования ТЗ реальным условиям эксплуатации КВОУ в Калининграде. Этот вопрос нужно было решать на основе многолетних наблюдений Росгидромета для данного региона, причем не на уровне двух метров, как это принято, а на высоте установки КВОУ. Такой мониторинг окружающей среды могла осуществлять специализированная лаборатория с помощью аппаратуры, которая позволяет определять предельно-допустимую концентрацию (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. До выдачи ТЗ на проектирование ВЗТ эту работу должен выполнять заказчик на месте предполагаемого воздухозабора ГТУ.

Климатическое исполнение «У» (умеренный климат) и категория размещения 1 (эксплуатация на открытом воздухе) согласно ГОСТ 15150-69 предполагает работу ВЗТ при следующих параметрах окружающего воздуха:

– температура –40...+45 °С;

– среднегодовая относительная влажность 75 % при температуре +15 °С;

– барометрическое давление 84,0...106,7 кПа.

Приведенные в ТЗ температурные условия окружающей среды не соответствуют требованиям ГОСТ для климатического исполнения «У». Самовольное снижение требований по температуре окружающей среды на несколько градусов позволяет проектанту ВЗТ использовать более дешевые, но менее качественные материалы при изготовлении металлоконструкций.

Кроме того, эксплуатация ВЗТ в таких условиях предусматривает устойчивую к внешним условиям окраску всех наружных и внутренних

поверхностей. В соответствии с ТЗ, покрытия необходимо наносить на подготовленную поверхность (дробеструйная подготовка и обезжиривание растворителем).

Конструктивное исполнение КВОУ

Как видно на *рис. 1.1*, оба КВОУ имеют горизонтальную крышу без погодных козырьков. Конструктивно отсутствие погодных козырьков на КВОУ при высокой среднегодовой влажности окружающей среды Калининграда выглядит неоправданным. Скапливающиеся на крыше атмосферные осадки в виде снега и дождя беспрепятственно попадают внутрь КВОУ. Наглядным подтверждением этого является влага и ржавчина на внутренней стороне входных жалюзи (*рис. 1.2*). На этом же фото отчетливо видно отслоение краски у вертикальных стоек противообледенительной системы (ПОС), что свидетельствует о некачественной подготовке металлических поверхностей к окраске. Но именно это специально оговаривалось в ТЗ в разделе эстетических и эргономических требований к КВОУ. Нарушение этих требований могло привести к тому, что облупившаяся краска вместе с потоком воздуха беспрепятственно попадала в блок фильтров грубой очистки (ФГО), расположенный сразу за блоком воздухоподогрева. Лишь удаление этой краски вручную позволило избежать в дальнейшем загрязнения фильтров.

Рис. 1.2. ПОС и входные жалюзи КВОУ ГТЭ-160

Конструктивное исполнение вертикальных стоек постоянного сечения блока воздухоподогрева также показывает, что проектанты КВОУ не были знакомы с современными разработками в этой области. В соответствии с техническими характеристиками ГТЭ-160 в систему воздухоподогрева КВОУ (из-за определенной ступени компрессора) подается воздух под давлением 1,05 МПа и температурой 583К. Естественно, при прохождении по трубопроводу ПОС давление падает, а сам воздух охлаждается. Для эффективной работы системы целесообразно использовать сужающиеся (конусные) поверхности теплообмена, как это делалось в аналогичных системах общепризнанных производителей КВОУ ГТУ.

Проектные и технологические ошибки анализируемой конструкции привели к разрыву кожуха трубопровода ПОС. Лабораторные исследования этого кожуха показали, что толщина металла составляла 2 мм, сварные швы выполнены дуговой сваркой вручную и имеют многочисленные поры в сечении.

Согласно ОСТ 36-80-81 «Сварка при монтаже стальных строительных конструкций», кожух воздухонагревателей относится к первой группе изделий, работающих в особо тяжелых условиях – под давлением и при повышенных температурах. Минимальная толщина свариваемых деталей должна быть 5 мм, класс прочности стали – С38/23. Таким образом, налицо грубейшие нарушения стандартов при проектировании и изготовлении ПОС. В современных технологиях материалом для ПОС является нержавеющая сталь. В данном проекте производители решили обойтись низкокачественными сталями, что неминуемо ведет к ржавлению трубопроводов системы и поступлению частиц металла на фильтрующие элементы КВОУ.

Следует также заметить, что современные ПОС оснащаются глушителями, которые снижают уровень шума при выходе воздуха под давлением через отверстия в блок воздухоподогрева. Здесь же такие технические решения не использовались, поэтому при запуске ПОС был слышен характерный свист выходящего под давлением воздуха («паровозный свисток»). Это является грубейшим нарушением санитарных норм по шуму. Кроме того, система воздухоподогрева не снабжена заслонкой (малым шибером) для регулирования подачи горячего воздуха при работе ГТЭ на частичных нагрузках.

Блок ФГО состоял из фильтра-коагулятора (влагоотделитель) и фильтров грубой очистки. Фильтр-коагулятор (*рис. 1.3а*) – PS-50 (стекловолокно толщиной 50 мм), класс очистки G3; фильтры грубой очистки (*рис. 1.3б*) – ФяВ, класс очистки G3. Фильтры были установлены в КВОУ под углом примерно 20° к осевому входу потока. Под ними располагался металлический поддон, представляющей собой емкость для сбора улавливаемой влаги.

Фильтр-коагулятор имел незначительную площадь загрязнения, что говорит о его неправильном расположении относительно потока воздуха (*рис. 1.3а*). Вся остальная площадь фильтра не участвовала в процессе очистки воздуха. Фильтры ФяВ располагались непосредственно над PS-50 и не имели видимых загрязнений (*рис. 1.3б*). Обращают на себя внимание разные по величине зазоры за рамками фильтров (достигающие иногда нескольких десятков мм). Зазоры более 1 мм уже недопустимы, так как они позволяют грязному воздуху беспрепятственно поступать в блок

а) *б)*

Рис. 1.3. Фильтры грубой очистки: а) коагулятор PS-50; б) ФяВ

фильтров тонкой очистки, минуя блок ФГО. Кроме того, металлический поддон для сбора влаги и установка ФГО под углом вызывает дополнительные гидравлические потери. Приборы зафиксировали перепад давления на фильтре-коагуляторе 140 Па. Вызывает недоумение использование в качестве ФГО фильтров типа ФяВ, имеющих тот же класс очистки G3, что и для коагулятора. В прежних технологиях для них использовали соотношение классов очистки G2/G4. В качестве ФГО используют карманные фильтры, хорошо зарекомендовавшие себя в системах очистки воздуха ГТУ.

Блок фильтров тонкой очистки (ФТО) состоял из 1200 патронных (картриджных) фильтров, расположенных фронтально к направлению потока воздуха (*рис. 1.4*). Размеры фильтр-элемента 265×410 мм, площадь фильтрующего материала 4,26 кв. м, материалом является целлюлозная смесь. Компания – производитель фильтров неизвестна на рынке газотурбинных технологий. По внешнему виду фильтры напоминают фильтр-элементы, применяемые в автомобильной промышленности (для автомобилей КамАЗ). Очевидна неправильная установка ФТО в КВОУ: ***подвод воздуха организован через внутренний диаметр патронного (картриджного) фильтра с использованием меньшей поверхности фильтрующего материала, что приводит к увеличению перепада давления на фильтрах и сокращению срока их службы*** (*рис. 1.4а*).

Как уже отмечалось, перепад давления на ФТО достигал 1100 Па. Нетрудно подсчитать, что при работе ГТЭ-160 на номинальном режиме объемный расход воздуха составит 418 м^3/с. Таким образом, на каждый из 1200 патронных фильтров приходится 1254 куб. м воздуха в час, что, по нашему мнению, в три раза превосходит возможности поверхности такого фильтра.

а) *б)*

Рис. 1.4. Блок фильтров тонкой очистки:
а) подвод воздуха к ФТО; б) ФТО и привод байпасных клапанов

Чтобы уточнить класс очистки, заявленный поставщиком как F7, патронные фильтры по инициативе руководства Калининградской ТЭЦ-2 были переданы для испытаний немецкому производителю фильтров. На специализированном аэродинамическом стенде было проведено тестирование чистого и использованного (грязного) фильтров. По результатам испытаний было установлено, что расход воздуха через патронные фильтры настолько велик, что определить класс фильтра в соответствии с какой-либо испытательной нормой невозможно. Другими словами, такой патронный фильтр не может эффективно работать в КВОУ, поскольку спроектирован для других условий эксплуатации (расхода воздуха). Испытания показали, что перепад давления на чистом фильтре чрезвычайно низок. Это происходит из-за открытой структуры фильтрующего материала, позволяющей просачиваться через нее большому количеству частиц пыли. В соответствии со стандартом EN 779 (соответствует ГОСТ 8002-74), пылеемкость патронного фильтра составила всего 14 г (для примера: картриджные фильтры компании Nordic Air Filtration имеют пылеемкость более 2 кг). Перепад давления на грязном фильтре, полученном для тестирования, достигал 1690 Па. В связи с разрежением давления перед компрессором (1,5 кПа), обусловленным таким значительным перепадом давления на ФТО, зафиксирован изгиб вертикальных стоек их крепления. Известно, что на материал фильтра значительное воздействие оказывает влага, поступающая в ФТО (*см. рис.1.4а*), поэтому целлюлоза практически не применяется в газотурбинных технологиях.

ФТО установлены на «чистой стороне» КВОУ, что противоречит мировому опыту и практике проектирования ВЗТ для энергетических ГТУ (*рис. 1.4б*). Для замены фильтров обслуживающий персонал должен захо-

дить на «чистую сторону» КВОУ, размонтировать грязные и установить новые фильтры. Все это может привести к загрязнению ВЗТ, к тому же существует опасность попадания забытого крепежа и инструментов в блок шумоглушения и проточную часть компрессора ГТУ. ***Для устранения этой конструкторской ошибки необходимо развернуть блок фильтров тонкой очистки на 180 градусов.***

«Чистая сторона» КВОУ по своей стерильности должна быть сравнима с чистотой в операционной».

Но, как видно на *рис. 1.4б*, в этом месте расположен байпасный клапан с электроприводом, который сам по себе несет риски для ГТУ из-за наличия большого количества крепежа. Любая открутившаяся гайка или винт могут стать причиной повреждения лопаточного аппарата турбомашины. Обычно в качестве байпасных клапанов используют более простую, но эффективную противовесную систему доступа воздуха к ГТУ в обход фильтров КВОУ.

В известных конструкциях предусмотрен обогрев уплотнения открывающейся части этого клапана для предотвращения примерзания. В соответствии с ТЗ блок байпасных клапанов должен иметь фильтрующие элементы, чтобы обеспечивать элементарную очистку воздуха, поступающего в обход блоков фильтров. Однако это требование не было выполнено, что создает дополнительную угрозу попадания посторонних предметов (листвы деревьев, мусора и т. п.) и птиц прямо в блок шумоглушения, что неминуемо приведет к его повреждению.

Рис. 1.5. Дефекты глушителя шума

На *рис. 1.5* можно видеть повреждения соединений пластин шумоглушения и перфорированных листов глушителя. Состояние глушителя шума не дает оптимистичных прогнозов относительно обеспечения санитарных норм по уровню шума. Кроме того, налицо реальная опасность разрушения блока шумоглушения с вытекающими из этого последствиями для ГТУ.

Воздуховод, соединяющий КВОУ и глушитель шума с приемным патрубком компрессора ГТУ, были выполнены таким образом, что углы конструкции расположены внутри воздушного тракта. Это создает искусственные аэродинамические барьеры, которые приводят к возникновению зон турбулентности и дополнительным гидравлическим потерям.

Воздуховод снабжен запорной заслонкой, предназначенной для предотвращения попадания посторонних предметов на вход ГТУ при техническом обслуживании КВОУ. Во время работы ГТЭ-160 запорная заслонка должна быть открыта. Из-за неправильной установки запорной заслонки в воздуховоде началось ее самопроизвольное закрытие, и осевой компрессор установки № 11 при наборе нагрузки достиг границы помпажа. Благодаря своевременным действиям оператора на блоке управления ПГУ, удалось избежать аварии ГТУ.

Результат эксплуатации данной системы подготовки циклового воздуха ГТУ наглядно виден на *рис 1.6*: отложения черного цвета на коке входного устройства компрессора.

Рис. 1.6. Отложения на входном коке компрессора ГТЭ-160

Следует добавить, что лабораторные анализы образцов металлов, примененных при изготовлении КВОУ, показали, что в металлоконструкциях использовались металлы с содержанием Mn порядка 0,5 %. Известно, что в низколегированных сталях типа 09Г2С содержание Mn составляет 1,3–1,7 %. Другими словами, очевидно, что изготовители КВОУ для ГТЭ-160 Калининградской ТЭЦ-2 использовали низкокачественные и дешевые марки стали.

В качестве общих замечаний следует отметить, что в КВОУ вообще не было предусмотрено освещения. При трехметровой высоте блоков ФТО и ФГО и отсутствии дневного освещения обслуживание КВОУ становится не только многотрудной, но и опасной работой с точки зрения техники безопасности. Снятие одного фильтра – задача для троих работников: один держит переносную лестницу, на которой стоит другой, снимающий фильтр, а третий освещает рабочее место переносным фонарем. Неслучайно замена 1200 штук ФТО на ТЭЦ заняла несколько дней, в течение которых ни электроэнергия, ни тепло не вырабатывались.

Результаты обследования ВЗТ ГТЭ-160 обсуждались на совещании по надежности РАО «ЕЭС России» в 2006 году, на котором были сделаны следующие выводы:

1. По объективным данным оба ВЗТ находятся в аварийном состоянии. Дальнейшая их эксплуатация может привести к аварии ГТЭ-160. Данная конструкция ВЗТ не только не соответствует лучшим образцам ведущих фирм в области воздухоочистки, но имеет очевидные технические ошибки.

2. Поручить проектирование, изготовление и поставку для Калининградской ТЭЦ-2 двух ВЗТ для ГТЭ-160 американскому производителю воздушных фильтров и КВОУ компании Donaldson, имеющей большой опыт в изготовлении такой продукции.

3. Подготовить «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок».

Резюме

1. На основании обследований, выполненных Жоховым В. Л. совместно с начальником котлотурбинного цеха «Калининградская ТЭЦ-2» Савельевым О. А. и его заместителем Ленёвым С. Н., было принято решение о полном демонтаже двух ВЗТ для ГТЭ-160 Калининградской ТЭЦ-2.

2. Компания Donaldson спроектировала, изготовила и поставила на Калининградскую ТЭЦ-2 два ВЗТ для ГТУ.

3. «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок» были утверждены РАО «ЕЭС» России в 2007 году [2].

1.2. Новые воздухоприемные устройства ГТЭ-160 на Калининградской ТЭЦ-2

В течение первой половины 2007 года на Калининградской ТЭЦ-2 были заменены два отечественных ВЗТ для ГТЭ-160, признанные аварийными уже через четыре месяца после начала эксплуатации. Поставщиком новых ВЗТ выступила американская компания Donaldson.

Опытно-промышленная эксплуатация новых ВЗТ на первом энергоблоке Калининградской ТЭЦ-2 началась 26 июля 2007 года (*рис. 1.7а*) [3].

а) *б)*

Рис. 1.7. ВЗТ компании Donaldson на Калининградской ТЭЦ: а) КВОУ; б) воздуховоды

Однако с первых дней эксплуатации персонал котлотурбинного цеха обратил внимание на повышенное разрежение давления на входе в компрессор ГТЭ-160 [4]. В *табл. 1.1* приведены параметры работ ВЗТ ГТУ-12 за октябрь 2007 года. Анализ этих параметров в течение нескольких месяцев показал тенденцию увеличения разрежения давления на входе в компрессор ГТУ с ростом температуры наружного воздуха и, как следствие этого, снижения мощности и открытия входного направляющего аппарата компрессора. Как видно из приведенных данных, разрежение на входе в осевой компрессор ГТУ при номинальной нагрузке превышало 1400 Па.

Такое разрежение ограничивало работу ГТЭ на номинальном режиме. Экономические потери от недовыработки электроэнергии вынудили сотрудников Калининградской ТЭЦ-2 начать поиск технических причин этих явлений. По длине и периметру горизонтального и вертикального воздуховодов (*рис. 1.7б*) были выбраны сечения, где были просверлены отверстия и установлены приборы для замеров скорости потока и давления.

Параметры работы ВЗТ и ГТУ-12 за октябрь 2007 года ***Таблица 1.1***

	Перепад давлений на ФТО, кПа	Разрежение на всасе компрессора, кПа	Температура наружного воздуха, °С	Относительная влажность, %	Электрическая нагрузка, МВт
1	0,370	1,209	13,835	76,347	123,596
2	0,440	1,424	12,271	89,735	146,302
3	0,435	1,414	11,656	83,461	146,303
4	0,438	1,414	11,713	77,583	146,520
5	0,435	1,395	11,373	85,290	143,870
6	0,404	1,291	12,677	84,523	130,993
7	0,447	1,429	11,192	85,220	148,108
8	0,445	1,428	11,134	80,492	148,278
9	0,434	1,403	9,866	61,467	147,759
10	0,425	1,389	8,041	71,688	147,898
11	0,423	1,380	9,785	78,775	145,122
12	0,435	1,414	8,896	87,471	148,893
13	0,426	1,399	7,579	69,678	149,547
14	0,430	1,395	7,535	71,852	149,444
15	0,434	1,406	8,889	62,510	149,262
16	0,444	1,428	10,947	71,491	149,034
17	0,446	1,440	13,262	78,042	147,741
18	0,447	1,436	10,700	81,185	149,064
19	0,432	1,399	7,025	71,760	149,464

	Перепад давлений на ФТО, кПа	Разрежение на всасе компрессора, кПа	Температура наружного воздуха, °С	Относительная влажность, %	Электрическая нагрузка, МВт
20	0,442	1,427	5,744	72,167	153,204
21	0,008	0,046	3,847	77,268	3,466
22	–0,005	0,001	4,983	75,331	0,067
23	–0,003	0,000	7,304	67,725	0,554
24	–0,005	0,001	6,555	82,819	0,558
25	–0,004	0,001	7,480	79,271	0,331
26	–0,003	0,001	5,355	91,162	0,000
27	0,003	0,003	11,048	75,455	0,000
28	–0,005	0,002	8,716	90,317	0,000
29	–0,007	0,000	9,483	85,279	0,000
30	0,166	0,554	9,905	83,728	52,433
31	0,453	1,451	7,574	85,068	152,861

Результаты замеров показали, что по всей длине воздуховода отмечаются повышенные значения скорости потока и потери давления. В вертикальном воздуховоде в районе шиберной заслонки замер давлений оказался невозможен из-за пульсаций потока воздуха. Показания приборов говорили о серьезных конструкторских ошибках проекта ВЗТ.

Обследование ВЗТ, выполненное В. Л. Жоховым совместно с начальником котлотурбинного цеха Калининградской ТЭЦ-2 О. А. Савельевым в октябре 2007 года, подтвердило эти предположения. Выводы, сделанные на основании этого обследования, легли в основу протокола совещания по вопросу соответствия ВЗТ техническому заданию на изготовление и поставку.

В соответствии с ТЗ воздухозаборный тракт ГТУ, состоящий из КВОУ, глушителя шума и воздуховодов, должен соответствовать современному уровню газотурбинных технологий. Начальное значение гидравлического сопротивления ВЗТ не должно превышать 100 мм. вод. ст., а неравномерность поля скоростей на входе в осевой компрессор ГТУ должна быть не более 2 %. Замеры этих параметров воздушного потока на различных режимах эксплуатации ГТУ показали, что они не соответствуют требованиям ТЗ на изготовление и поставку ВЗТ.

Эмпирическим путем установлено, что увеличение перепада давления в воздуховоде на 5 мм. вод. ст. ведет к снижению выработки электроэнергии на 0,1 %. Понятно, что невыполнение требований ТЗ по гидравлическому сопротивлению ВЗТ – прямой путь к серьезным финансовым потерям, обусловленным недовыработкой и недоотпуском электроэнергии

потребителям. Кроме того, флуктуации потока, возникшие на входе в осевой компрессор, приводят к неравномерному по высоте и окружности обтеканию его лопаточных аппаратов. При этом одна часть лопаток находится в зоне повышенных скоростей, другая – в области пониженных. Трансформация поля скоростей сопряжена с ухудшением характеристик компрессоров, поскольку в области замедленного течения не достигается расчетная степень повышения давления [5]. Возникающая при этом неравномерная нагруженность лопаточных венцов индуцирует появление в них знакопеременных напряжений, приводящих к усталостному разрушению. Другими словами, невыполнение требований ТЗ по неравномерности воздушного потока на входе в осевой компрессор негативно влияет на надежность не только ГТУ, но и всего энергоблока.

Обследование ВЗТ Калининградской ТЭЦ-2 выявило серьезные недостатки проектных решений. Результаты выполненных замеров и расчетов показали, что *проходное сечение воздуховодов в два раза меньше расчетного*, в результате чего зафиксированы повышенные значения скоростей потока и потери давления. Второе, что бросается в глаза – это неоптимальное, с точки зрения теории аэродинамики, размещение переходного воздуховода между КВОУ и горизонтальным воздуховодом (*рис. 1.8*). Переходной

а) *б)*

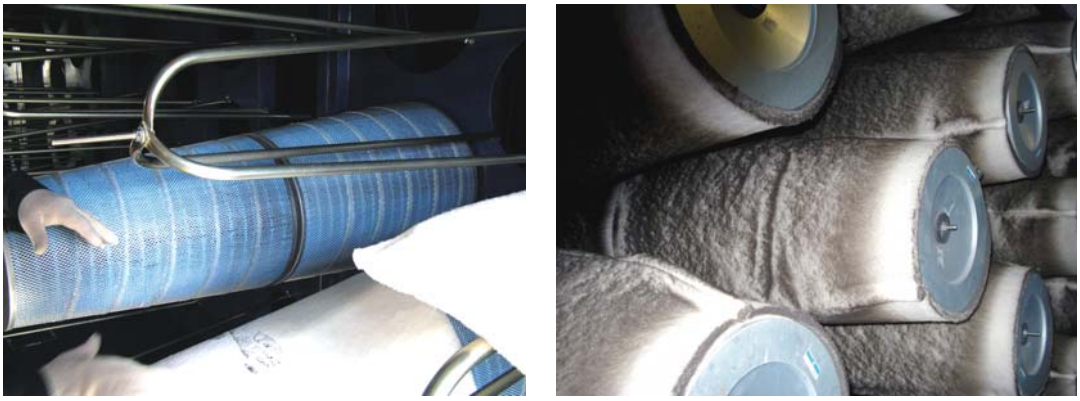
Рис. 1.8. Вид сбоку на КВОУ:
а) байпасный клапан (БК); б) модули для установки фильтров

воздуховод присоединен к корпусу КВОУ не по всей его высоте, а ниже байпасных клапанов, что не позволяет обеспечить оптимальный расход воздуха через верхние модули КВОУ. Такое конструкторское решение неминуемо ведет к неравномерной пылевой нагрузке на воздушные фильтры по высоте КВОУ, а также к неоптимальным скоростям натекания воздушного потока на фильтры верхнего яруса. В результате эффективность воздушных фильтров снижается, их жизненный цикл сокращается. В данной системе фильтрации циклового воздуха ГТУ предусмотрено две ступени воздухоочистки. Конструктивная особенность фильтр-элементов заключается в том, что поверх пары конических фильтров второй ступени очистки натягиваются съемные фильтр-чулки первой, предварительной ступени очистки (ФГО, *рис. 1.9а*). Они предназначены для очистки атмосферного воздуха от крупных частиц пыли, зерен и других загрязнений.

По данным производителя, их улавливающая способность согласно стандартам ASHRAE – 90 %, что соответствует классу очистки EU4.

Вторая ступень (тонкой) очистки ФТО – конические фильтры, которые 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.

В процессе обследования КВОУ было установлено, что фильтр-чулки нижнего модуля (*рис. 1.9б*) имеют большее загрязнение фильтрующей поверхности, чем фильтр-чулки верхнего модуля. Это полностью подтверждает предположение о неравномерной пылевой нагруженности воздушных фильтров по высоте КВОУ и неоптимальном использовании фильтров верхнего модуля.



а) *б)*

Рис. 1.9. Фильтр-чулки: а) установка; б) нижнего яруса КВОУ

В соответствии с требованиями РАО «ЕЭС России», для снижения трудоемкости работ по замене воздушных фильтров и сокращения простоев ГТЭ по этой причине высота модулей КВОУ не должна превышать 2,2 метра. В данной конструкции КВОУ высота модулей 2,7 метра, что значительно затрудняет замену фильтров и обслуживание КВОУ в целом.

Общее количество парных ФТО в пяти модулях КВОУ для ГТЭ-160 – 300 штук. Столько же ФГО – 300 штук, малый и большой конусы. По заявлению производителя, конусная форма фильтр-элементов лучше прямоугольной, поскольку позволяет увеличить поверхность фильтрующего материала и, следовательно, пылеемкость фильтра, сохраняя при этом компактные размеры.

Утверждение, что круглые фильтры с материалом Spider-Web лучше (с аэродинамической точки зрения) прямоугольных со складками фильтрующего материала является спорной. Это объясняется тем, что открытая часть складки на выходящей стороне круглого фильтра значительно меньше, чем на входящей. Следствием этого являются относительно высокие потери давления на выходе складки, что существенно 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 [6] было показано, что фильтры класса F8 и F9 со стекловолоконной средой Wet Laid имеют более низкие и более ровные кривые дифференциалов давления, чем фильтры со средой Spider-Web. При этом фильтр класса F8 с микроскладками из стекловолоконной среды WetLaid удерживает в 1,43 раза больше пыли, чем фильтр со средой Spider-Web, а аналогичный фильтр класса F9 – в 3,3 раза больше.

Анализ эксплуатации КВОУ прежней конструкции на Калининградской ТЭЦ-2 показал, что высокая влажность воздуха в этом регионе оказывает существенное влияние на работу воздушных фильтров. Поскольку фильтр-элементы новой системы расположены параллельно потоку воздуха, фильтр предварительной очистки будет улавливать влагу в том же направлении, оставаясь влажным в течение долгого времени. Есть вероятность, что накопленная атмосферная влага будет проникать и аккумулироваться в конусных фильтрах, вызывая рост давления на фильтр-элементах. Это предположение было подтверждено в процессе обследования КВОУ ГТУ (*рис. 1.10*).

а) *б)*

Рис. 1.10. КВОУ ГТУ: а) чистая сторона; б) грязная сторона

На *рис. 1.10а* отчетливо видна лужа воды на чистой стороне КВОУ за фильтрами. На грязной стороне КВОУ в большом количестве были обнаружены тела пчел и других двукрылых насекомых, что говорит об отсутствии противомоскитных сеток перед воздушными фильтрами (*рис. 1.10б*). Осевые размеры фильтр-элементов (порядка 1,44 м) ставят под сомнение утверждение производителей ВЗТ о легкой замене фильтров-чулков большого конуса при работающей ГТУ. Если учесть, что эту процедуру необходимо осуществлять на высоте более 2,2 метра без специальных приспособлений, для фильтров верхнего ряда эта задача выглядит трудновыполнимой.

В соответствии с инструкцией производителя по эксплуатации замена ФГО должна осуществляться, когда пыль, проникающая до задней части фильтра-чулка, достигает его изнанки, которая в этом случае темнеет. Рекомендуется раз в месяц визуальную проверять состояние ФГО, поскольку измерительные приборы, контролирующие перепад давления на ФГО, не предусмотрены. Датчики давления фиксируют только перепад давления за ФТО, то есть суммарный перепад давления на фильтрах. Естественно, такое конструктивное решение значительно усложняет контроль за ФГО и увеличивает время и трудоемкость технического обслуживания системы фильтрации воздуха ГТУ.

Замену ФГО можно не проводить до тех пор, пока, согласно инструкции по эксплуатации, перепад давления на ФТО не достигнет максимального значения 100 мм. вод. ст. Однако в соответствии с требованиями производителя ГТЭ-160 сопротивление от входа в КВОУ до улитки компрессора ГТУ, включая сопротивление глушителя и воздуховода, должно быть не более 70 мм. вод. ст. Из сопоставления этих документов следует, что как минимум инструкция по эксплуатации данной системы фильтрации не соответствует требованиям производителя ГТУ.

Ранее уже отмечалось, что увеличение перепада давления в воздуховоде (на фильтрах) на 50 Па ведет к снижению выработки электроэнергии ГТУ на 0,1 %. В случае соблюдения инструкции по эксплуатации по достижению предельного перепада давления на ФТО превышение потерь давления в воздуховоде над допустимым значением составит 30 мм. вод. ст. Нетрудно подсчитать, что такое решение приведет к снижению выработки электроэнергии ГТУ на 0,6 %.

При возрастании перепада на воздушных фильтрах до 1200 Па, обусловленном их обмерзанием или загрязнением, должны открываться байпасные клапаны и перепускать воздух помимо воздушных фильтров. В соответствии с документом «Общие технические требованиями к системам фильтрации воздуха для энергетических ГТУ» РАО «ЕЭС России» величина перепускаемого воздуха через байпасные клапаны должна составлять 30 % от общего расхода воздуха. В данной конструкции КВОУ предусмотрен перепуск лишь 10 % воздуха.

В результаты обследования ВЗТ компании Donaldson были сделаны следующие выводы:

1. ВЗТ данной конструкции не соответствует техническим требованиям РАО «ЕЭС России» к системам фильтрации воздуха энергетических ГТУ.
2. ВЗТ для ГТЭ-160 Калининградской ТЭЦ-2 признаны несоответствующими техническому заданию на изготовление и поставку.
3. Для обеспечения соответствия ВЗТ техническому заданию американский производитель КВОУ обязался за свой счет выполнить реконструкцию ВЗТ для ГТУ № 11 и 12 в период с июня по октябрь 2008 года.
4. Для снижения трудоемкости замены фильтров производитель ВЗТ обязан предоставить устройство, позволяющее устанавливать фильтр-чулки больших конусов при работающих ГТУ.
5. Технические задания на изготовление и поставку ВЗТ для энергетических ГТУ отечественных ТЭЦ должны соответствовать руководящему документу «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических ГТУ» РАО «ЕЭС России» для данного вида продукции.

Резюме

Новые воздуховоды для двух ВЗТ ТЭЦ-160 были изготовлены на заводе «Янтарь» в Калининграде и установлены на Калининградской ТЭЦ-2 за счет средств американской компании Donaldson.

Трава всегда кажется зеленее по ту сторону забора.

Английская поговорка

1.3. Изготовление ВЗТ ГТЭ-110 для Ивановских ПГУ

Конструктивные и технологические ошибки, допущенные при проектировании и изготовлении ВЗТ для Калининградской ТЭЦ-2, продолжили тиражироваться и для других отечественных ТЭЦ. Характерным примером такого подхода является проектирование и изготовление КВОУ для ГТЭ-110 для Ивановских ПГУ.

КВОУ представляет собой четырехъярусную модульную конструкцию, обеспечивающую трехсторонний подвод циклового воздуха к ГТУ [7]. Каждый модуль [8] (*рис. 1.11*) состоит из каркаса, изготовленного из металлических уголков, перекрытия, пола, настила. В состав КВОУ входит 12 модулей, установленных друг на друга по четыре с каждой стороны всаса.

Для предотвращения попадания снега и дождя, а также посторонних предметов на вход ГТУ на модулях крепятся погодные козырьки с жалюзи. За погодными козырьками в каждом модуле установлены две роллеты, которые при эксплуатации ГТУ находятся в открытом, а при проведении регламентных работ, например при замене фильтров, – в закрытом положении.

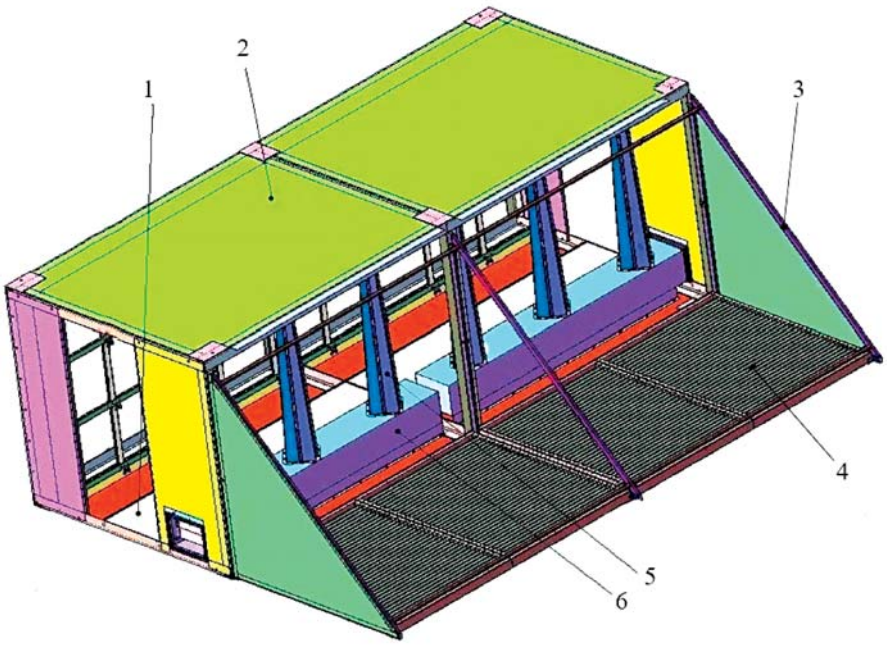


Рис. 1.11. Модуль КВОУ ГТЭ-110:
1 – настил; 2 – перекрытие; 3 – боковая стойка погодного козырька;
4 – решетка (сетка) погодного козырька; 5 – стойка ПОС; 6 – короб ПОС

В состав каждого модуля входит ПОС, обеспечивающая подогрев циклового воздуха при работе ГТУ во время знакопеременных температур наружного воздуха (–5...+5 °С). Горячий воздух из-за одной ступени компрессора ГТУ по трубопроводу поступает к коробам и стойкам системы ПОС. Через отверстия в стойках горячий воздух смешивается с холодным атмосферным для предотвращения обмерзания фильтров. В качестве фильтрующей системы КВОУ принята комбисистема, в состав которой входят фильтр-коагулятор, предфильтр карманного типа и фильтр тонкой очистки (конечный фильтр) с классами очистки G2/G4/F8 [8] по стандарту DINEN 779 соответственно. В пластмассовом корпусе комбисистемы под коагулятором имеются отверстия для отвода отсепарированной влаги. Отвод влаги из всех коагуляторов должен идти по дренажной системе, расположенной внутри модулей и соединенной трубопроводами.

КВОУ имеет четыре блока байпасных клапанов (ББК), размещенных один над другим по одному на каждом ярусе КВОУ. ББК оснащены противовесной системой открытия при достижении разрежения давления на входе в ГТУ 1177 Па. Закрытие байпасного клапана осуществляется вручную.

Для предотвращения попадания посторонних предметов в проточную часть ГТУ при работе через байпас, ББК оснащен шестью фильтрами ФяВ класса очистки G2 согласно ГОСТ Р 51251-99. Расход воздуха через байпасные клапаны определен в объеме 10 % от номинального расхода воздуха ГТУ. На верхнем ярусе КВОУ предусмотрена грузовая лебедка, позволяющая поднимать фильтры для их замены.

В соответствии с техническим заданием целью разработки ВЗТ являлось *«создание унифицированного устройства в блочном исполнении, соответствующего лучшим образцам ведущих фирм в области воздухоочистки»*.

КВОУ проектировалось в климатическом исполнении «У» категории 1, ГОСТ 15150 и должно обеспечивать надежную работу ГТУ при температуре наружного воздуха –40...+45 °С при относительной влажности до 98 % (при +25 °С), барометрическом давлении воздуха 84,0...106,7 кПа, при концентрации аэрозольных включений до 5 мг/м^3 и среднегодовой запыленности всасываемого воздуха 0,4 мг/м^3. Гидравлическое сопротивление ВЗТ должно быть не более 0,98 кПа (100 мм вод. ст.). Неравномерность поля скоростей ($\Delta V/V_{ср}$) на входе в воздухоприемный патрубок ГТУ не должна превышать 2 %.

Авторы в очередной раз обращают внимание заказчиков ВЗТ на недопустимость устанавливать взаимоисключающие требования к условиям их работы. Влажность воздуха, приближающаяся к 100 %, присуща тро-

пическим или прибрежным зонам, а среднегодовая концентрация пыли более 2 мг/м^3 свойственна пустынным районам. В первом случае необходимо применение ступени фильтрации для удаления влаги, а в другом – влагоотделение не нужно вовсе.

В соответствии с ГОСТ 29328-92 при концентрации аэрозольных включений 5 мг/м^3 допускается работа ГТУ не более 100 часов в год. При этом в другом пункте ТЗ устанавливается требование безотказной наработки КВОУ не менее 8000 часов работы ГТУ. Согласитесь, трудно сделать разумный выбор фильтрующей системы КВОУ при наличии таких противоречивых требований заказчика. Тем не менее в данном случае выбор сделан был правильно в пользу статических фильтров. Однако класс очистки системы предфильтр/фильтр тонкой очистки G4/F8 нельзя назвать экономически обоснованным. Выбор фильтрующей системы КВОУ необходимо делать на основании анализа стоимости жизненного цикла ГТУ, т. е. учитывать не только затраты на первоначальную закупку фильтров, но также расходы на их замену, утилизацию, промывку компрессора, а прежде всего учитывать затраты на дополнительное топливо и недополученную прибыль из-за недоотпуска электроэнергии, обусловленные загрязнением проточной части ГТУ. С точки зрения минимизации стоимости эксплуатации ГТУ и энергоблока в целом, применение системы предфильтр/фильтр тонкой очистки G4/F9 в 1,4 раза экономичнее системы G4/F8 для ГТУ V.94.2A и в 1,6 раза для ГТУ LM2500PK [6].

Нельзя назвать оправданным и использование одних роллет для обеспечения регламентных работ в КВОУ. Роллеты в закрытом состоянии предотвращают попадание посторонних предметов извне в КВОУ, но не гарантируют защиту глушителя и проточной части ГТУ от посторонних предметов, например, оставленных персоналом при замене фильтров. Для этой цели на современных ВЗТ используются электроприводные устройства (flapdoor – управляемая заслонка), перекрывающие воздуховод при проведении регламентных работ в КВОУ. В случае консервации или длительного простоя ГТУ эти устройства также ограничивают объем воздуха, осушаемого от влаги с помощью силикагеля между управляемой заслонкой и проточной частью ГТУ. При использовании только роллет этот объем многократно возрастает, что значительно увеличит расход силикагелевого осушителя и не гарантирует необходимой влажности воздуха, а это чревато коррозией лопаток ГТУ.

Необоснованной выглядит величина расхода воздуха через байпасные клапаны в размере 10 % от номинального расхода воздуха ГТУ. В соответствии с документом «Общие технические требования к системам

фильтрации воздуха энергетических ГТУ» РАО «ЕЭС России» эта величина должна составлять не менее 30 %.

Несмотря на то что гидравлическое сопротивление глушителя и воздуховода, а также неравномерность потока воздуха на входе в ГТУ проверялось продувками модели на аэродинамическом стенде, аналогичная проверка КВОУ не осуществлялась, что также является нарушением соответствующих требований.

На основании ТЗ проектантом КВОУ должна создаваться расчетно-конструкторская документация (РКД), включающая расчеты, подтверждающие принятые конструктивные решения. Согласно ТЗ конструкция ВЗТ должна выдерживать внутреннее разрежение (давление) до 2000 Па (204 мм вод. ст.), ветровые и снеговые нагрузки в соответствии с требованиями СНиП 2.01.07.85. ВЗТ должен сохранять работоспособность при сейсмическом воздействии до 7 баллов по шкале MSK-64. Трудно предположить, что такие расчеты производились до начала изготовления КВОУ. Иначе необъяснимыми выглядят принятые конструктивные решения. Для изготовления перекрытия, пола и настила модулей использовался металл толщиной 2 мм, а не 3 мм, как это было по проекту (*см. рис. 1.11*). На *рис 1.12а* видно, к чему привела такая замена. Перекрытие модуля имеет рифленую по-

а)

б)

Рис. 1.12. Модуль КВОУ:
а) перекрытие листом металла толщиной 2 мм;
б) прожиг металла

верхность, а прогибы металла достигают 20 мм. Низкопрофессиональная сварка элементов модуля с прожигами металла усугубила ситуацию (*рис. 1.12б*). Для устранения этих недостатков необходимо было укреплять перекрытие модуля изнутри металлическими уголками. Требования ТЗ к технологичности при производстве и эксплуатации ВЗТ предусматривали, что технология изготовления модулей должна обеспечивать их плотное беззазорное соединение, исключающее возможность подсасывания внутрь атмосферного воздуха и пыли при работающей ГТУ. Однако, как видно на *рис. 1.12б*, эти требования не были выполнены по причине использования не сплошной, а точечной сварки. Более 50 % стыковых соединений имели непровар металла, недопустимый зазор между сварными соединениями достигал 12 мм. Несоблюдение технологии изготовления модулей привело к еще более серьезным нарушения требований ТЗ. При проектировании ВЗТ должна быть обеспечена устойчивая к внешним воздействиям окраска всех наружных и внутренних поверхностей, которая соответствует 3 классу по ГОСТ 9.032.

а)

б)

Рис. 1.13. Изготовление модулей КВОУ:
а) коррозионный металл;
б) качество сварки

Покрытия необходимо наносить на подготовленную поверхность (пескоструйная или дробеструйная обработка и обезжиривание растворителем) при температуре не ниже +5 °С. На *рис. 1.13* показано изготовление модулей в цехе, где зафиксировано массовое нарушение требований ТЗ к КВОУ. Использовался коррозионный, необработанный металл. Работы проводились не на специальной платформе, как

этого требует технология изготовления подобных изделий, а на неровном полу цеха (*рис. 1.13а*).

Качество сварки и обработки сварных швов очень низкое, не соответствующее ГОСТ 52.64-80 (*рис. 1.13б*). Неудивительно, что модули имеют значительные перекосы и смещения, которые устранялись с помощью ударного инструмента.

Имеют места деформации металла до 12 мм от применения кувалды. Для выполнения требований ТЗ по качественной подготовке металлоконструкций к окраске необходимо наличие соответствующего участка или цеха дробеструйной (пескоструйной) обработки металла. Кроме того, качественная обработка металла требует дополнительных затрат, увеличивающих стоимость 1 кг изделия примерно в 2 раза. Желание снизить таким способом себестоимость своей продукции изготовителем может впоследствии привести к большим проблемам для заказчика. Опыт Калининградской ТЭЦ-2 является ярким примером таких последствий.

Всем заказчикам КВОУ целесообразно перед размещением заказа у потенциальных изготовителей ознакомиться с их производственной базой, станочным парком, квалификацией конструкторов, технологов и рабочих.

На *рис. 1.14а* зафиксировано нанесение краски на неподготовленную поверхность металлоконструкции модуля, а на *рис. 1.14б* показано коррозионное состояние металла на уже изготовленном и частично окрашенном модуле. Эти фотографии говорят о том, что контроль технологии окраски и ее качества своевременно не проводился.

а) *б)*

Рис. 1.14. Окраска модулей КВОУ: а) по неподготовленному металлу; б) после окраски

Через три недели с начала хранения изготовленных модулей на открытом воздухе из-под краски выступила ржавчина. И это при условии, что модули были установлены на деревянные подставки, исключающие воздействие на них почвенной влаги, и хранились в естественных усло-

виях окружающей среды, без агрессивного воздействия песка и пыли, содержащихся в цикловом воздухе ГТУ. Следует обратить внимание, что ржавчина выступила на «чистой» стороне воздуха КВОУ, то есть уже за местом установки фильтров тонкой очистки. Это означает, что какой бы высокой эффективности фильтрующие элементы ни применялись в данном КВОУ, в проточную часть ГТУ все равно будет попадать воздух с элементами ржавого металла и облупившейся краски, как это было на Калининградской ТЭЦ-2.

Не менее серьезную опасность фильтрующим элементам несет и конструктивное исполнение ПОС в данном проекте. Стойки ПОС были выполнены из нержавеющей стали 08Х18Н10Т, а короба этой системы из низколегированной стали 09Г2С (*см. рис. 1.11*). Такой подход к проектированию ПОС нельзя назвать соответствующим лучшим образцам ведущих фирм в области воздухоочистки, как это было заявлено в ТЗ.

Рис. 1.15. Расположение стоек ПОС и комбисистемы фильтров

Рис. 1.16. Внутреннее состояние короба ПОС КВОУ

В трубопровод ПОС горячий воздух поступает из-за одной из ступеней компрессора под давлением 0,8 МПа и температурой 290 °С. Естественно, что после завершения работы ПОС происходит охлаждение горячего воздуха и конденсация влаги в ее элементах. В современных газотурбинных технологиях с целью недопущения коррозии металла под воздействием влаги все элементы ПОС КВОУ выполняются из нержавеющей стали. Принятое в данном проекте конструктивное решение не позволяет предотвратить попадание ржавых частиц металла на фильтрующие элементы КВОУ, расположенные непосредственно за стойками ПОС (*рис. 1.15*).

Но в данном проекте ситуация с ПОС была еще более усугублена, поскольку обработка металла должным образом, как это требует ТЗ, не производилась. Если на *рис. 1.15* мы видим окрашенную

внешнюю поверхность коробов ПОС, то на *рис. 1.16* зафиксировано состояние их внутренней поверхности. Мало того что в нарушение современных газотурбинных технологий вместо нержавеющей стали в данной конструкции использована сталь 09Г2С, так она еще и не обрабатывалась должным образом.

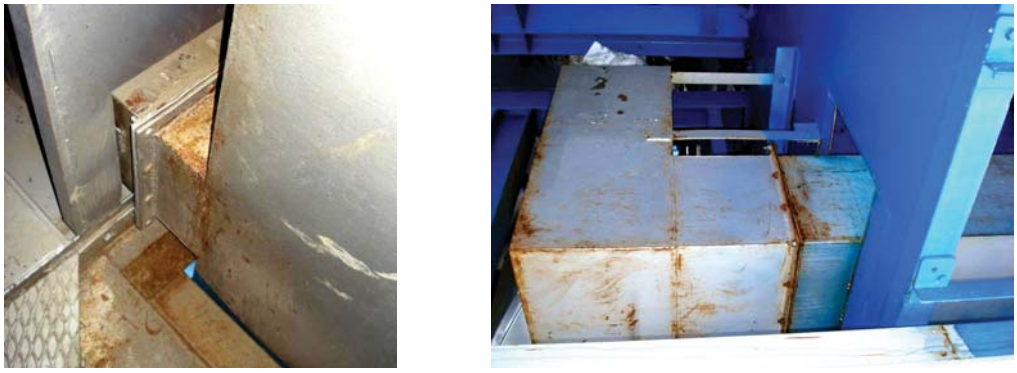
Иначе говоря, еще до начала эксплуатации ГТУ изготовителем КВОУ были заложены условия неудовлетворительной работы фильтрующих элементов. Под воздействием влажности окружающей среды, а также горячего воздуха, поступающего в систему ПОС из компрессора ГТУ, коррозия металла в коробах этой системы будет быстро прогрессировать. В результате этого горячий воздух из ПОС с частицами ржавого металла вместе с атмосферным воздухом будет поступать прямо на фильтры. При этом частицы ржавого металла своими острыми кромками будут повреждать фильтрующий материал, резко повышать перепад давления на фильтрах, уменьшая тем самым их срок службы. После повреждения фильтрующей поверхности регенерация коагуляторов будет невозможна, необходима их досрочная замена. А это потребует от персонала электростанции дополнительных, сверхплановых закупок фильтров, что повлечет увеличение эксплуатационных расходов на ГТУ. Эти расходы будут неоправданно возрастать за счет ускоренного загрязнения фильтров, поскольку помимо грязного атмосферного воздуха в них будет поступать ржавчина из ПОС. Увеличится частота замены фильтров, а следовательно, и длительность простоев энергоблока для их замены. Себестоимость выработки электроэнергии возрастет, увеличится цена киловатт-часа для потребителей.

Очевидно, проектировщики и изготовители данных КВОУ не учли опыт эксплуатации ВЗТ Калининградской ТЭЦ-2, где из-за нарушения технологий изготовления и сварки произошел разрыв кожуха ПОС. Согласно ОСТ 36-80-81 «Сварка при монтаже стальных строительных конструкций», элементы противообледенительной системы относятся к первой группе изделий, работающих в особо тяжелых условиях – под давлением и при повышенных температурах. Минимальная толщина свариваемых деталей должна быть 5 мм, класс прочности стали – С38/23, толщина стали коробов ПОС составляла всего 3 мм (*см. рис. 1.11*). Кроме того, как зафиксировано на *рис. 1.16*, короба сваривались не сплошной, а точечной сваркой. Налицо грубейшие нарушения в проектировании и изготовлении ПОС КВОУ. Такой подход к изготовлению КВОУ может повлечь за собой человеческие жертвы. На Калининградской ТЭЦ-2 лишь чистая случайность не привела к подобным последствиям при разрыве кожуха ПОС, находящегося под давлением горячего воздуха.

Анализ конструкции ВЗТ для ГТЭ-110 с точки зрения аэродинамики был выполнен в работах [9–11], где также отмечается нерациональное изготовление этого оборудования и его низкая эффективность. Следует отметить, что при испытаниях ГТЭ-110 на Ивановской ГРЭС произошла деформация воздуховода ВЗТ.

Резюме

После сдачи в эксплуатацию ВЗТ ГТЭ-110 сразу проявились недостатки его изготовления. На *рис. 1.17а* зафиксирована ржавчина на коробе ПОС внутри КВОУ, а на *рис. 1.17б* ржавчина на ПОС на внешней стороне КВОУ, изготовленных не из нержавеющей стали.



а) *б)*

Рис. 1.17. Ржавчина ПОС: а) внутри КВОУ; б) на внешней стороне КВОУ (2011 год)

Из-за неудовлетворительной работы ПОС в зимний период эксплуатации ГТУ в КВОУ поступало большое количество снега (*рис. 1.18а*). Фильтры-коагуляторы Poret PPI 10 класса G2 пропускали снег, и фильтры второй и третьей ступени в пластмассовом коробе блокировались им (*рис. 1.18б*).

а) *б)*

Рис. 1.18. Занос снегом: а) КВОУ; б) фильтров комбисистемы (2012 год)

В октябре 2021 года на КВОУ ГТУ первого энергоблока Ивановских ПГУ при проведении сварочных работ произошел пожар, в результате чего оборудование было полностью уничтожено (*рис. 1.19*) [12].

Рис. 1.19. Пожар на КВОУ Ивановских ПГУ

Истинные слова не бывают приятны,
приятные слова не бываю истинны.

Абу Иса ат-Термизи

1.4. Выбор ВЗТ для энергетических ГТУ «Мосэнерго»

С началом 2000-х годов в столичном регионе начался резкий рост спроса на электроэнергию и мощность. В условиях значительного увеличения потребления резерв собственной генерации в московском энергоузле стал снижаться, и уже в 2003 году столичная энергосистема из избыточных перешла в разряд энергодефицитных. При этом действующие мощности постепенно устаревали как морально, так и физически.

25 мая 2005 года в Московской энергосистеме произошла крупнейшая за весь период функционирования энергетики региона системная авария, в результате которой оказались «погашенными» не только объекты наземного транспорта, метрополитена, коммунальной инфраструктуры, жилищно-бытового сектора столицы, но и нарушено энергоснабжение шести соседних областей: Калужской, Тульской, Рязанской и других регионов.

В июне 2005 года генеральным директором ТГК-3 («Мосэнерго») был назначен А. Я. Копсов. Вспоминая то время, Анатолий Яковлевич отмечает, что в июне 2005 года было предельно ясно: технический курс «Мосэнерго» должен быть пересмотрен. Требовался срочный переход от «эволюционного» пути, то есть простого поддержания технического состояния электростанций на приемлемом уровне, к пути, если можно так выразиться, «революционному» – форсированному наращиванию генерирующих мощностей. На первом этапе предполагалось построить на базе новых парогазовых технологий четыре мощных энергоблока на станциях системообразующего сетевого кольца 220 кВ в северной части Москвы и Московской области: два блока мощностью 450 МВт на ТЭЦ-27, аналогичный блок на ТЭЦ-21. Суперсовременный энергоблок на ТЭЦ-26 в южной части Москвы мощностью 420 МВт планировалось построить на базе зарубежного оборудования и достичь рекордного для российской энергетики *КПД* в парогазовом цикле – 59 %. Второй этап программы предусматривал переоборудование действующих энергоблоков на ТЭЦ-9 и ТЭЦ-12 на базе парогазовой технологии [13].

Проектирование новых энергоблоков для ТЭЦ-27 и ТЭЦ-21 было поручено институту «Мосэнергопроект». И если с выбором основного газотурбинного оборудования было все ясно – отечественные ГТЭ-160 (ЛМЗ), то известных отечественных производителей воздухозаборных трактов для ГТУ большой мощности не было. Поэтому было принято решение обратиться к зарубежному опыту подготовки циклового воздуха ГТУ.

В течение многих лет самым известным зарубежных производителем воздушных фильтров и ВЗТ для энергетических ГТУ являлась американская компания Donaldson. Исходя из этого, «Мосэнергопроект» принял концепцию компании Donaldson по использованию в КВОУ ТЭЦ-27 очистки воздуха с помощью импульсных фильтров. Инициатором этой идеи был главный инженер института «Мосэнергопроект» П. Ф. Куликов. Его привлекало, что эти фильтры самоочищающиеся, как утверждала компания Donaldson, и их долгое время не нужно заменять. Мои многочисленные попытки переубедить его в этом мнении во время различных совещаний не увенчались успехом. Приводимые мной аргументы: импульсная очистка воздуха предназначена для эксплуатации в пустынях для удаления крупнодисперсных частиц песка и уровень шума во время обратного импульса сжатого воздуха превышает 90 дБ, что неприемлемо для городской черты, – не приводили к желаемому результату.

Поняв тщетность попыток переубедить П. Ф. Куликова, я обратился к Н. И. Серебрянникову, который с 2000 по 2007 год был советником генерального директора ОАО «Мосэнерго». Авторитет Нестора Ивано-

вича, бывшего в 1988–2000 гг. генеральным директором «Мосэнерго», Лауреата Государственных премий был настолько высок, что его помощь в этом вопросе могла быть бесценной.

Выслушав меня, Нестор Иванович произнес следующую фразу: «У нас в «Мосэнерго» не осталось газотурбинистов, а я, как старый паросиловик, всегда думал, что надо заниматься только водоподготовкой для котлов. А тут еще, оказывается, и воздух надо чистить». Благодаря своему огромному опыту, Нестор Иванович сразу понял важность моего сообщения и проинформировал генерального директора ТГК-3 «Мосэнерго». По поручению А. Я. Копсова мне было предложено проанализировать уже подготовленный проект по третьему энергоблоку ТЭЦ-27 с ВЗТ компании Donaldson для ГТЭ-160.

Я подготовил обширную справку по этому проекту со своими замечаниями по системе импульсной очистки циклового воздуха и ВЗТ ГТЭ-160. После моего часового доклада генеральный директор ТГК-3 («Мосэнерго») А. Я. Копсов принял мои аргументы в пользу статической системы фильтрации циклового воздуха ГТЭ-160 и отменил решение главного инженера института «Мосэнергопроект» П.Ф. Куликова по импульсной системе очистки воздуха ГТУ для ТЭЦ-27.

Это была победа! Победа разума и инженерной мысли. Мы отстояли энергетику Москвы от малоэффективной в городских условиях импульсной очистки воздуха ГТУ.

Теперь предстояло выбрать зарубежного поставщика статической системы фильтрации воздуха и ВЗТ для ГТЭ-160. Выбор был сделан в пользу шведской компании Camfil Farr которая оснащала ВЗТ ГТУ Siemens AB от SGT-100 до SGT-800. Однако эта компания не имела опыта проектирования и изготовления ВЗТ для ГТУ большой мощности. С целью расширения своих возможностей Camfil Farr в июне 2006 году приобрела немецкую инженерную компанию Kaefe-Raco, специализирующуюся на проектировании ВЗТ для ГТУ большей мощности. В кооперацию с Camfil Farr вступила отечественная компания ООО «Энстром», которая изготавливала часть металлоконструкций ВЗТ в нашей стране.

Ознакомившись с чертежами ВЗТ Camfil Farr, я обратил внимание на ряд недостатков как конструкции, так и системы фильтрации воздуха КВОУ ГТУ. Своими соображениями я поделился с руководством АО «Силовые машины» (Москва). Было очевидно, что погодные козырьки КВОУ, металлические коагуляторы и пластмассовое крепление фильтров не соответствовали климатическим условиям московского региона. Я рекомендовал не согласовывать одну и ту же конструкцию ВЗТ для ТЭЦ-27 и ТЭЦ-21, поскольку один ВЗТ будет расположен в Московской области,

а другой в городской черте. ***Использование одного и того же проекта ВЗТ ГТЭ-160 с неопробованной системой фильтрации может привести к систематической ошибке сразу на трех энергоблоках и двух ТЭЦ***. По договору с руководством АО «Силовые машины» (Москва) мной был подготовлен отчет по другим западным компаниям – производителям ВЗТ для энергетических ГТУ. Отчет был принят, меня поблагодарили за проделанную работу, но конструкция ВЗТ Camfil Farr осталась без изменений.

Немецкое представительство Camfil Farr (Kaefe-Raco), несмотря на то что в Швеции изготавливаются воздушные фильтры, оснастило спроектированные и изготовленные ими КВОУ фильтрами немецких производителей. Так на КВОУ ГТУ третьего энергоблока ТЭЦ-27 были установлены фильтры компании немецкой компании EMW Filtertechnik.

В октябре 2007 года третий энергоблок ТЭЦ-27 был принят в эксплуатацию. С началом осенне-зимнего периода стало ясно, что небольшие погодные козырьки КВОУ не обеспечивают защиту воздушных фильтров от атмосферных осадков (*рис. 1.20а*). Несмотря на установку на первой ступени КВОУ коагуляторов класса G2, комбинированная система фильтров, состоящая из фильтра грубой очистки класса G4 и фильтра тонкой очистки класса F8, намокала (*рис. 1.20б*).

а) *б)*

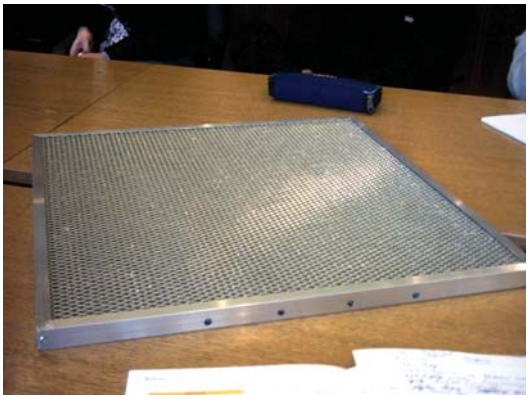
Рис. 1.20. КВОУ ТЭЦ-27: а) погодные козырьки; б) мокрые ФТО (02.02.2008)

В дальнейшем в КВОУ 4-го энергоблока ТЭЦ-27 и 11-го блока ТЭЦ-21 были установлены воздушные фильтры компании Camfil Farr. На *рис. 1.21* приведены фрагменты презентации фильтров компанией Camfil Farr на ТЭЦ-21 в 2007 году.

а)

б)

в)



г)

Рис. 1.21. Фрагменты презентации воздушных фильтров компанией Camfil Farr на ТЭЦ-21 в 2007 году:
а) главный инженер ТЭЦ-21 С. С. Коржук и Jan-Peter Nilsson (Camfil Farr);
б) комбисистема Camfil Farr; в) карманный фильтр Camfil Farr;
г) металлический коагулятор 64 MZ Camfil Farr.

В течение презентации продукции компании Camfil Farr, на которую меня пригласил главный инженер ТЭЦ-21 Сергей Семенович Коржук, я объяснил шведскому представителю Jan-Peter Nilsson (*рис. 1.21а*), что в нашей стране зимой металлические коагуляторы будут быстро блокированы снегом и замерзнут (*рис. 1.21г*). Ответ был по-скандинавски краток: «*Наши системы работают во многих странах мира без нареканий*». Аналогичный ответ я получил и на вопрос о надежности пластмассовых креплений Snap-On фильтра грубой к фильтру тонкой очистки в составе комбисистемы (*рис. 1.21б*). Но наибольшую озабоченность у меня вы-

звали карманные фильтры Camfil Farr (*рис. 1.21в*). Прошитые карманы, тонкий фильтровальный материал, его крепление в оцинкованной рамке фильтра вызывало сомнение в надежности конструкции этого фильтр-элемента. Кроме того, конструкция КВОУ, как и на ТЭЦ-27, не предусматривала штатных противомоскитных сеток, необходимых для предотвращения попадания двукрылых насекомых в воздушные фильтры в летний период эксплуатации ГТУ. Свое мнение о качестве представленных на презентации фильтров и конструкции КВОУ я высказал главному инженеру ТЭЦ-21. Но, как сообщил мне Сергей Семенович, решение об использовании этих фильтров и конструкции КВОУ на ТЭЦ-21 уже принято руководством.

Опыт эксплуатации этих фильтров на КВОУ энергоблока № 11 на ТЭЦ-21 и № 4 ТЭЦ-27 подтвердил мои предположения. На *рис. 1.22а* зафиксировано состояние металлических фильтров-коагуляторов на КВОУ ГТУ ТЭЦ-21 в зимний период эксплуатации.

а) *б)*

Рис. 1.22. Фильтры компании Camfil Farr:
а) блокирование снегом металлического коагулятора;
б) разрыв фильтровального материала карманного фильтра

Массовый разрыв фильтровального материала карманных фильтров произошел через два месяца эксплуатации КВОУ ГТУ (*рис. 1.22б*). 107 карманных фильтров официально (в присутствии представителей Camfil Farr) были признаны поврежденными, 65 из них заменены на новые. Для предотвращения заноса снегом металлических фильтров-коагуляторов поставщиком ВЗТ было рекомендовано не выключать антиобледенительную систему. На ТЭЦ-21 анти-айсинг КВОУ был включен всю зиму без остановки и без учета температур наружного воздуха.

В зимний период эксплуатации на КВОУ ГТУ четвертого энергоблока ТЭЦ-27, не выдержав морозов, вышли из строя порядка 60 % пластмассовых креплений Snap-On фильтров грубой к фильтрам тонкой

очистки в составе комбисистемы. Крепление фильтров друг к другу стало невозможным.

В весенне-летний период эксплуатации ГТУ фильтровальный материал воздушных фильтров КВОУ ГТУ ТЭЦ-21 и ТЭЦ-27 покрывался двукрылыми насекомыми и плодами цветения растений. В результате рос перепад давления на них, оказывая негативное влияние на выработку электроэнергии ГТУ и жизненный цикл системы очистки воздуха.

Можно было бы гордиться и радоваться, что все мои предсказания сбылись, но на душе не было веселья. Я задавался вопросом: «*Почему в одном случае с импульсной очисткой воздуха меня услышали, и мы спасли Москву от неэффективного оборудования, сэкономив многие миллионы государственных средств, а в другом нет?*».

В 2006 году заместитель главного инженера РАО «ЕЭС России» В. К. Паули на заседании штаба по надежности сказал мне: «*Владимир Леонидович, перестань спасать мир. Подумай о себе*». Вероятно, это и есть ответ на мой вопрос.

Спасти мир – это задача под силу только атлантам, которые держат небо, стоя на ступеньках Эрмитажа в моем родном Санкт-Петербурге. А вот улучшить этот мир можно постараться. Поэтому, несмотря на данную мне рекомендацию, многие годы я консультировал и продолжаю консультировать всех, кто ко мне обращается по вопросам воздухоочистки ГТУ. Я уверен, что люди, которым я оказал помощь в решении их проблем, передав им свои знания и опыт, в свое время помогут другим и, таким образом, надежда сохранится, что мир изменится в лучшую сторону.

И жить еще надежде
До той поры, пока
Атланты небо держат
На каменных руках.

Александр Городницкий

Отсутствие специалистов по очистке воздуха ГТУ явилось одной из причин принятия неправильных технических решений во время начала использования парогазовых установок на отечественных ТЭЦ. Я уже неоднократно поднимал вопрос о необходимости введения курса фильтрации циклового воздуха ГТУ в энергетических институтах нашей страны.

Судьба распорядилась таким образом, что именно мне пришлось принимать участие в устранении недостатков систем фильтрации КВОУ ТЭЦ-21 и ТЭЦ-27.

Нет пророка в своем отечестве.
Матф., гл. 13, ст. 57

ВЗТ ГТУ – вспомогательное оборудование,
но не второстепенное.

В. Л. Жохов

Глава 2
ТРЕБОВАНИЯ К ВЗТ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГТУ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТЭЦ

В соответствии с документом «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок» РАО ЕЭС России [1] в зависимости от места расположения ГТУ КВОУ могут оснащаться погодными козырьками, сетками от птиц и крылатых насекомых, каплеуловителями, охладителями воздуха и антиобледенительными системами (АОС).

2.1. Погодные козырьки КВОУ ГТУ

Типы погодных козырьков

Погодные козырьки КВОУ предназначены для предотвращения попадания атмосферных осадков в виде дождя и снега на воздушные фильтры системы фильтрации циклового воздуха ГТУ. Решения по оснащению КВОУ погодными козырьками должны приниматься в зависимости от климатических зон эксплуатации оборудования, установленных согласно межгосударственного ГОСТ 15150–69. В соответствии с [1], в сельскохозяйственных регионах, крупных городах, в промышленных и прибрежных зонах рекомендуется применять погодные козырьки. Эти рекомендации обусловлены климатическими факторами: температурой и относительной влажностью воздуха, «розой ветров», ветровой и снеговой нагрузкой, количеством осадков в году, запыленностью атмосферного воздуха, вероятностью возникновения песчаных бурь и др. На основании этих данных, изложенных в техническом задании на проектирование и изготовление ВЗТ, принимается решение о выборе системы фильтрации циклового воздуха ГТУ, ориентации и количестве всасов КВОУ, целесообразности применения погодных козырьков.

В пустынных районах, где в течение года выпадает минимальное количество осадков, необходимость погодных козырьков КВОУ является опцией, которая выбирается по мере необходимости. В климатических районах с высокой влажностью и снеговой нагрузкой наличие погодных козырьков целесообразно (Санкт-Петербург). Черноморское побережье нашей страны также является климатической зоной с повышенной относительной влажностью атмосферного воздуха, однако в свое время на Сочинскую ТЭС были поставлены ВЗТ компании Donaldson для ГТУ с КВОУ без погодных козырьков (*рис. 2.1*). Нетрудно заметить сходство внешнего вида этого КВОУ с воздухозабором ГТУ на Калининградской ТЭЦ-2 (*см. рис. 1.1*). В результате этого фильтровальный материал системы очистки воздуха намокал, рос перепад давления на фильтрах, что приводило к снижению выработки электроэнергии. Кроме того, вместе с влагой в проточную часть ГТУ поступал загрязненный воздух, вызывая отложения на лопатках осевого компрессора, что также приводило к снижению технико-экономических показателей ГТУ [2].

Техническая целесообразность может потребовать исключения из правила оснащения ВЗТ ГТУ погодными козырьками, как это было сделано на ТЭЦ в Юго-Западном административном округе (ЮЗАО) Москвы, где КВОУ компании FAIST AIS (ФРГ) размещено в отдельном помещении над машинным залом (*рис. 2.2*). Отказаться от погодных козырьков можно в случае технического решения разместить воздухозабор не в осевом направлении, как было показано выше, а снизу (*рис. 2.3*).

Рис. 2.1. КВОУ ГТУ Siemens GT-10C на Сочинской ТЭС [2]

Рис. 2.2. КВОУ ГТУ Siemens SGT5-4000F ТЭЦ в ЮЗАО Москвы

Рис. 2.3. КВОУ со всасом воздуха снизу на Заволжском ЛПУ МГ

Такая схема воздухозабора в КВОУ ГТУ используется в основном на компрессорных станциях. При принятии такого технического решения необходимо обеспечить асфальтирование или бетонирование поверхности земли под КВОУ ГТУ для минимизации загрязняющих веществ на этой поверхности. Однако такой подход к воздухозабору КВОУ ГТУ редко, но встречается и на ТЭЦ, расположенных в городах. На *рис. 2.4* изображено КВОУ голландской компании Merrem & la Porte для ГТУ GE MS 9001E на ТЭЦ RoCa вблизи Роттердама.

Рис. 2.4. КВОУ ГТУ на ТЭЦ RoCa (Нидерланды) [3]

Голубой стрелкой показано направление всаса атмосферного воздуха в ВЗТ ГТУ. КВОУ закрыто по периметру круговой обшивкой, выполняющей функцию погодных козырьков и предотвращающей прямое попадание атмосферной влаги, песка и снега на всас ГТУ. Всас атмосферного воздуха в КВОУ осуществляется снизу, что позволяет за счет изменения направления потока воздуха отделить от него крупные частицы влаги и песка. Кроме того, круговая обшивка КВОУ позволяет исключить влияние бокового ветра на оптимальные (расчетные) скорости входного потока, что особенно важно при одностороннем всасе атмосферного воздуха, как в данном случае. Помимо этого, такое конструктивное решение позволяет за счет экранного эффекта дополнительно (помимо глушителя шума на всасе ВЗТ) снизить уровень шума, излучаемого ГТУ в городе. На расстоянии 1 м от КВОУ шума работающей ГТУ практически не слышно, что говорит о выполнении разработчиками ВЗТ санитарных норм по шуму [3].

Другой интересный научный подход к определению расположения всаса ВЗТ компании Pneumafil (США) для ГТУ 701F3 (Mitsubishi) был использован на ТЭЦ Saltend (Солт-Энд), расположенной на территории химического предприятия в Великобритании (*рис. 2.5*). Особый ин-

терес представляет окружающая среда, в которой работают ГТУ. Восточнее ТЭЦ располагается химическое производство компании British Petroleum, производящее 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. Наконец, западнее ТЭЦ расположена крупная частная компания, имеющая большие угольные склады. Местечко Солт-Энд (Salt End) в восточной части г. Хала (Hull) испытывает сильное негативное влияние сырости и тумана в зимний период. Безусловно, такие погодные условия значительно усложняют и без того непростую окружающую среду, в которой работает система фильтрации воздуха ГТУ.

Рис. 2.5. КВОУ ГТУ на ТЭЦ Saltend (Великобритания) [4]

Проанализировав превалирующее направление «розы ветров», и тот факт, что частички угольной пыли с близко расположенных складов под воздействием ветра поднимаются потоком воздуха вверх, было принято решение расположить КВОУ ГТУ на уровне земли без погодных козырьков [4].

В зависимости от климатических условий, «розы ветров», запыленности воздуха, расположения водоемов и рек, количество и ориентация всасов ВЗТ для мощных энергетических ГТУ может быть от одного до трех. На *рис. 2.6.* изображено КВОУ для ГТУ General Electric PG9311FA на ТЭЦ Delesto, принадлежащей химико-фармацевтическому концерну Akzo Nobel и расположенной вблизи города Делфзейла (Delfzijl, Нидерланды).

Рис. 2.6. КВОУ компании Merrem & la Porte на ТЭЦ Delesto [3]

Ориентация двухстороннего воздухозабора КВОУ обусловлена тем, что химико-фармацевтическое предприятие Akzo Nobel расположено на полуострове, выступающем в море и окруженном каналами. Для сни-

жения агрессивного влияния окружающей среды на газотурбинный двигатель КВОУ имеет два всаса, сориентированные таким образом, чтобы капли морской воды и частички соли не попадали прямо на их вход. Для предотвращения попадания в КВОУ атмосферных осадков в виде дождя и снега оно снабжено погодными козырьками.

Для ТЭЦ небольшой мощности, использующих в качестве турбомашины авиационные ГТУ, применяется отработанная на компрессорных станциях система воздухозабора, получившая из-за внешнего сходства название «гриб». На *рис. 2.7а* представлено фото ГТЭС мощностью 22,5 МВт, введенной в строй на Уфимской ТЭЦ-1. В основе энергоблока газотурбинный двигатель ПС-90ЭУ компании ОАО «Авиадвигатель». Всас воздуха в ГТУ осуществляется со всех четырех сторон КВОУ. На *рис. 2.7б* изображено КВОУ с дополнительным погодным укрытием ВЗТ для ГТУ LM2500+G4 в особой экономической зоне «Алабуга» Татарстана.

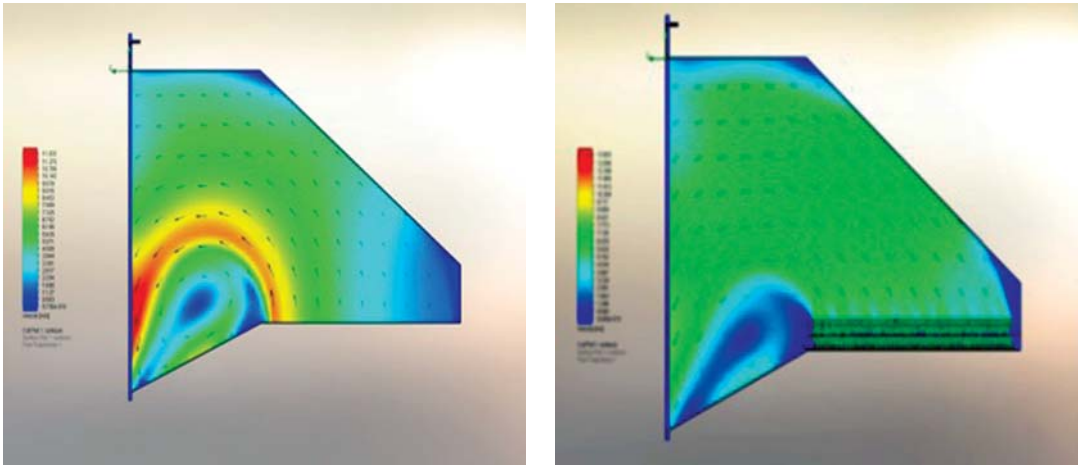
а) *б)*

Рис. 2.7. КВОУ ГТУ: а) ПС-90ЭУ на Уфимской ТЭЦ-1; б) LM2500+G4 в Алабуге

2.1.1. Моделирование течения воздушного потока в погодных козырьках КВОУ ГТУ

Форма и размеры погодных козырьков определяют направление и равномерность подвода атмосферного воздуха к системе фильтрации КВОУ ГТУ. В зависимости от конфигурации и оснащения погодных козырьков формируются зоны скоростей входного потока циклового воздуха ГТУ. На *рис. 2.8* представлены смоделированные с помощью программы Solid Works поля скоростей в одном и том же погодном козырьке с применением пластинчатого (жалюзийного) каплеуловителя на входе и без него. Как видно из представленых эпюр скоростей, в первом случае (*а*) на всасе

присутствует значительная зона пониженных скоростей (синий цвет), а при обтекании тупого угла на повороте – поле повышенных скоростей (красный цвет). Такое неравномерное поле скоростей на входе в фильтры КВОУ приводит к неоптимальным (нерасчетным) условиям очистки циклового воздуха ГТУ. Во втором случае (*б*) каплеуловитель сглаживает неравномерность потока, уменьшая зону пониженных скоростей на всасе и зону повышенных скоростей на повороте канала погодного козырька. При этом существенно увеличивается зона пониженных скоростей на повороте, что также негативно скажется на работе воздушных фильтров. Очевидно, что резкие повороты воздушного потока в погодных козырьках ведут к росту гидравлических потерь в них.



а) *б)*

Рис. 2.8. Поля скоростей в погодном козырьке КВОУ:
а) без каплеуловителя; б) с каплеуловителем

Не менее интересным и важным является моделирование в процессе проектирования погодных козырьков КВОУ ГТУ для регионов с высокой снеговой нагрузкой. С этой целью необходимо знать процесс образования снежинок и какие из них превалируют в данном регионе эксплуатации ГТУ. Рост снежинок (кристаллов льда) происходит за счет кристаллизации молекул воды из пара, содержащегося в атмосфере. Процесс кристаллизации возможен лишь при нарушении термодинамического равновесия, в данном случае, при перенасыщении пара. Кристаллизация – фазовый переход, когда вещество, в нашем случае вода, меняет фазу, причем свойства воды изменяются скачкообразно: газообразный пар – твердый лед. Свободная энергия кристаллов льда будет меньше, чем пара, потому избыток энергии выделится в виде скрытой

теплоты кристаллизации. Кристаллизация начинается на зародышах кристаллизации: посторонних частицах (например, пыли), заряженных частицах и пр. Скорость роста граней кристаллов льда существенно зависит от условий кристаллизации, и чем меньше скорость роста грани, тем больше ее размер, и наоборот [5]. Поэтому снежинки бывают пластинчатые, игольчатые, нитевидные и других форм (*рис. 2.9*).

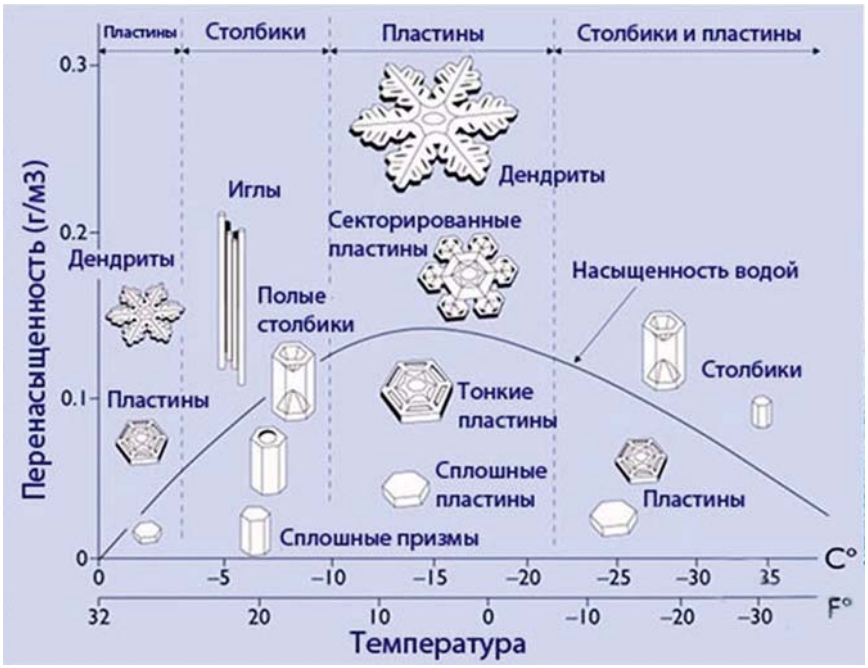


Рис. 2.9. Условия возникновения различного вида снежинок [5]

Для практического использования лучше подходит простая и достаточно широко используемая классификация твердых атмосферных осадков, предложенная в 1951 году Международной комиссией по снегу и льду Международной ассоциации гидрологических наук. Эта классификация определяет семь основных типов кристаллов снега: пластины, звездообразные кристаллы, столбики, иглы, пространственные дендриты, сросшиеся столбики и нерегулярные формы. К ним добавляются три дополнительных типа снеговых осадков: мокрый град (мягкий), ледяная крупа и град.

С помощью программы Solid Works проанализируем поступление нескольких наиболее часто встречающихся видов снежинок в типичные погодные козырьки КВОУ ГТУ. На *рис. 2.10* представлены фото принятых для расчета снежинок: пластин, звездообразных кристаллов и нерегулярных форм.

а) *б)* *в)*

Рис. 2.10. Формы снежинок: а) пластины; б) звездообразные; в) нерегулярной формы [5]

Характеристики снежинок, используемые для расчета, приведены в *табл. 2.1.*

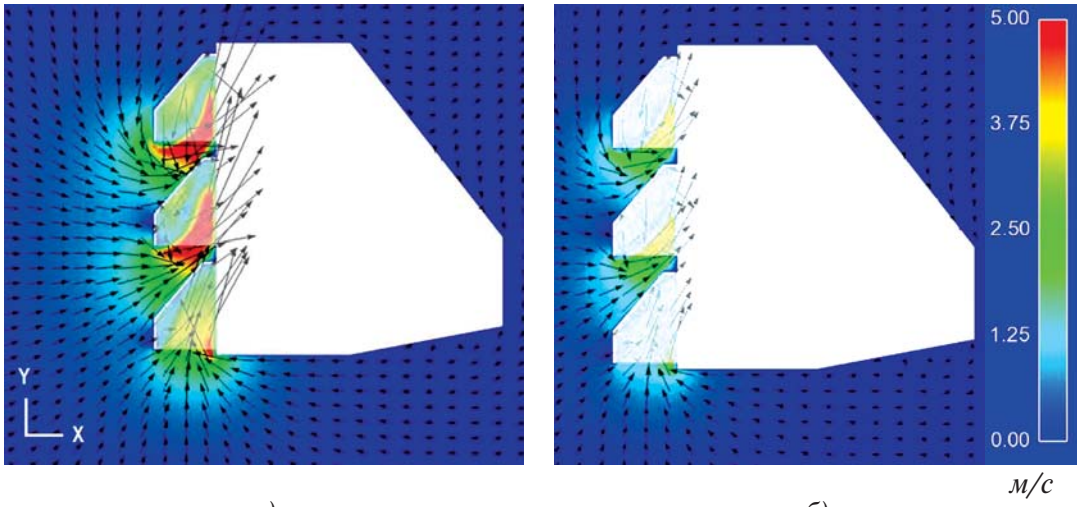
Характеристики снежинок ***Таблица 2.1***

Диаметр, мм	Плотность, кг/м^3		
	Пластины	Звезды	Нерегулярные
0,5	240,1	315,8	492,1
1,0	145,7	187,8	246,5
1,5	103,6	128,3	150,6
2,0	76,3	92,5	102,2

Расчет проводился для массового расхода воздуха в ГТУ 130 кг/с и 65 кг/с. Фронтальная скорость ветра на всасе КВОУ принималась 31 м/с, что соответствовало ветровой нагрузке в северных регионах нашей страны. Для обоих вариантов было исследовано 12 траекторий частиц с характеристиками снежинок, приведенных в *табл. 2.1* [6].

На *рис. 2.11* представлены результаты расчета при расходе воздуха 130 кг/с и 65 кг/с. Первоначально осевая (фронтальная) скорость ветра на входе в КВОУ была принята нулевой. Как видно из результатов расчета, при расходе воздуха 130 кг/с скорость потока перед погодными козырьками лежит в диапазоне 1,25–3 м/с, достигая значения 3,75 м/с. На срезе погодных козырьков поток воздуха ускоряется, достигая 5 м/с в самом узком сечении. Затем скорость потока снижается до 4 м/с при входе потока воздуха в расширяющуюся часть погодного козырька. Отмечается увеличение зоны и величины повышенных скоростей по высоте КВОУ.

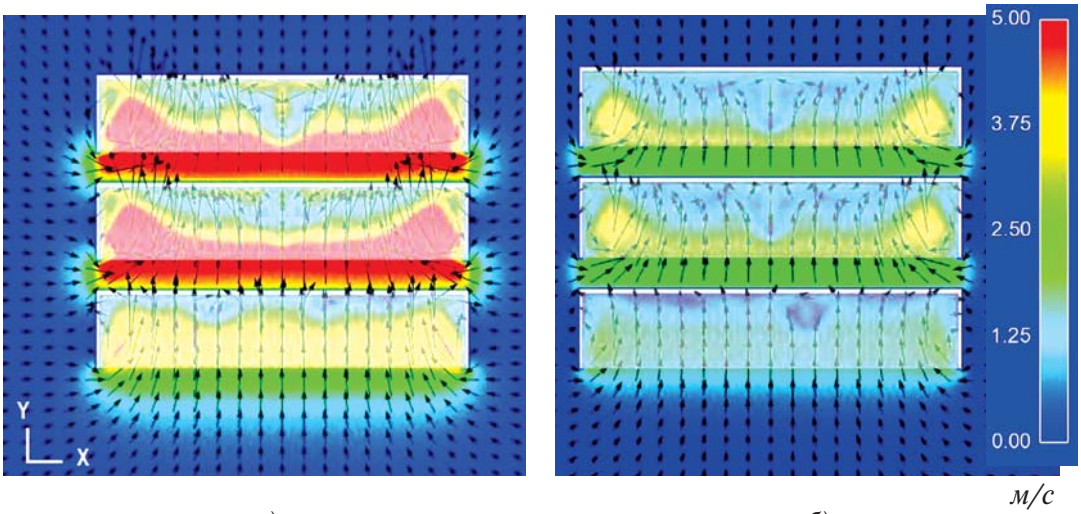
Для расхода воздуха в 2 раза меньше скорость потока перед погодными козырьками лежит в том же диапазоне, что и при увеличенном расходе. Однако зоны этих скоростей меньше, чем в первом случае. Скорость потока внутри погодного козырька не превышает 3,75 м/с.



а) *б)*

Рис. 2.11. Величина и векторы скорости по оси X при расходе: а) 130 кг/с; б) 65 кг/с

На *рис. 2.12* представлены поля скоростей во фронтальном сечении погодных козырьков КВОУ ГТУ при различных расходах воздуха.



а) *б)*

Рис. 2.12. Величина и векторы скорости по оси Y при расходе: а) 130 кг/с; б) 65 кг/с

Из представленных эпюр скоростей видно, что наибольшие их значения как в одном, так и другом случае достигаются в радиальном направлении по сторонам погодных козырьков.

На *рис. 2.13* представлено распределение масс снежинок в виде пластин по их размерам в погодных козырьках по высоте КВОУ при расходе воздуха 130 кг/с.

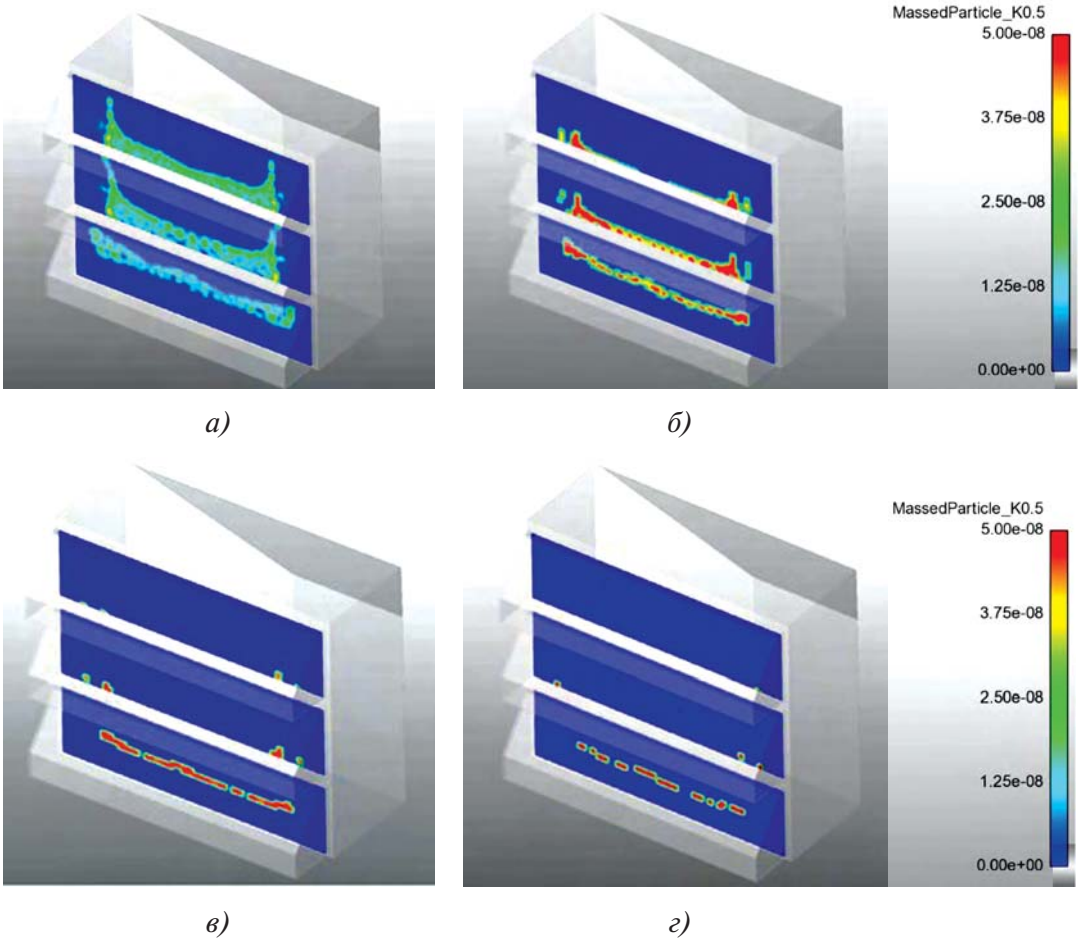
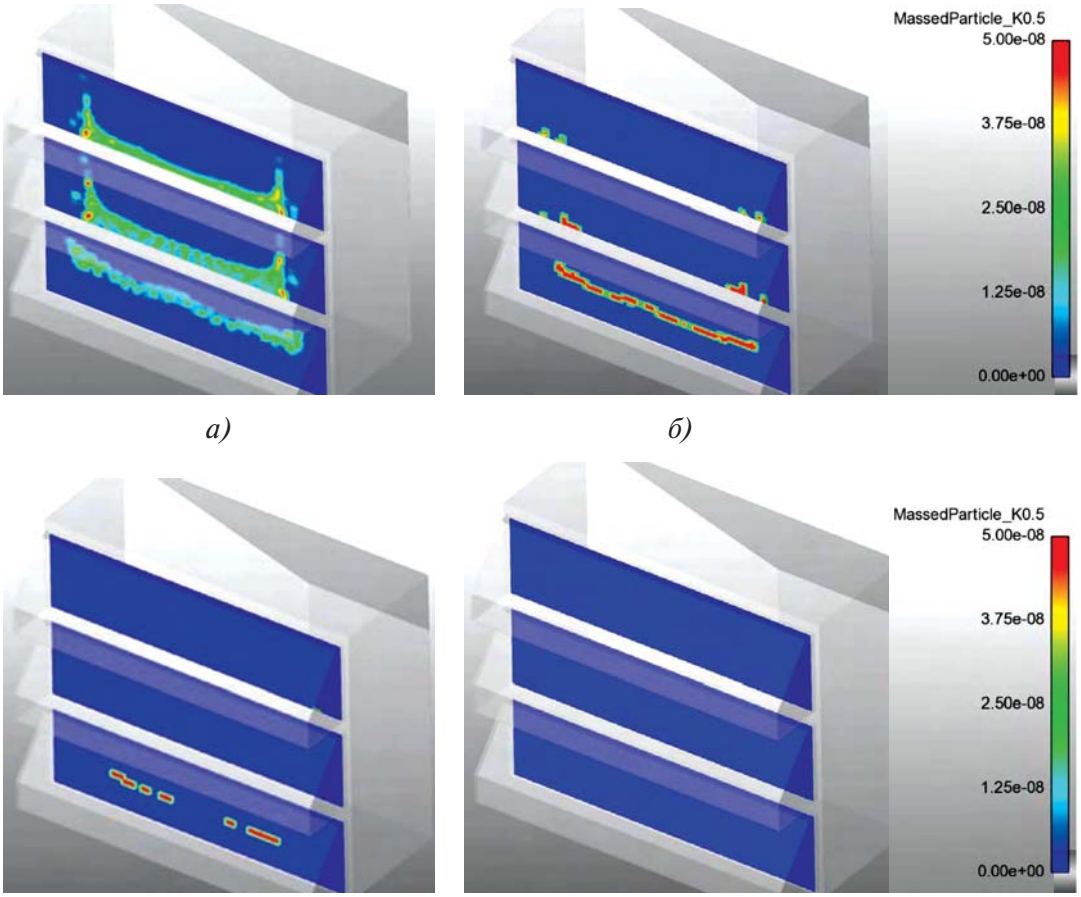


Рис. 2.13. Распределение масс снежинок в виде пластин по их размерам в погодных козырьках по высоте КВОУ: а) 0,5 мм; б) 1,0 мм; в) 1,5 мм; г) 2,0 мм

Из представленных результатов расчетов очевидно, что наименьшее количество (масса) пластин попадает в верхние ярусы КВОУ при расчетных значениях размера снежинок от 1,0 мм и выше. По мере увеличения размера снежинок их масса возрастает на нижнем ярусе КВОУ. При достижении размера 2,0 мм пластины на верхний ярус не попадают. На *рис. 2.14* представлены результаты расчета масс снежинок в виде звезд по их размерам в погодных козырьках по высоте КВОУ при расходе воздуха 130 кг/с. Тенденция уменьшения количества снежинок по высоте КВОУ по мере роста их размера сохраняется и для звездочек. Плотность снежинок в виде звезд выше, чем у пластин, поэтому они более тяжелые, и уже при размере 2,0 мм проникновения в погодные козырьки КВОУ не наблюдается.



а) *б)*

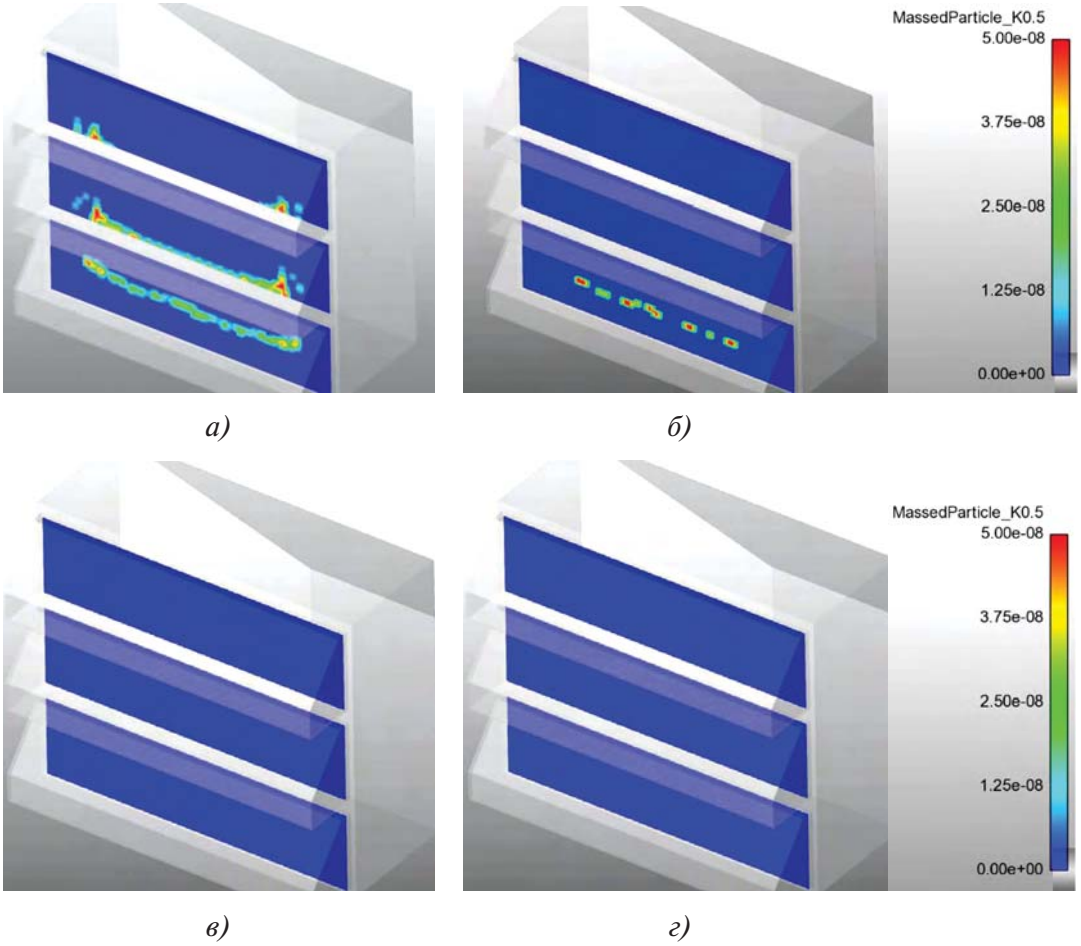
в) *г)*

Рис. 2.14. Распределение масс снежинок в виде звезд по их размерам в погодных козырьках по высоте КВОУ: а) 0, 5 мм; б) 1,0 мм; в) 1,5 мм; г) 2,0 мм

На *рис. 2.15* в изометрии приведены результата расчета масс снежинок нерегулярных форм по их размерам в погодных козырьках по высоте КВОУ при расходе воздуха 130 кг/с.

Как и в предыдущих расчетах наблюдается тенденция уменьшения количества снежинок на верхних ярусах КВОУ. Масса снежинок нерегулярных форм больше массы рассмотренных двух форм снежинок при тех же размерах по причине их большей плотности, поэтому при размерах 1,5–2,0 мм они практически не попадают на всас КВОУ.

Графически изобразим относительное проникновение снежинок в виде пластин, звезд и нерегулярной (нестандартной) формы различных размеров в погодные козырьки КВОУ при расходе воздуха 130 кг/с. Обозначим ярусы КВОУ: нижний (вход 1) синим цветом; сред-



а) *б)*

в) *г)*

Рис. 2.15. Распределение масс снежинок нерегулярных форм по их размерам в погодных козырьках по высоте КВОУ: а) 0,5 мм; б) 1,0 мм; в) 1,5 мм; г) 2,0 мм

ний (вход 2) красным цветом; верхний (вход 3) зеленым цветом (*рис. 2.16–2.18*).

Из представленных графиков видно, что наибольшее количество (масса) снежинок в виде пластин поступает на всас КВОУ по всем ярусам по сравнению с другими формами снежинок. Причем наибольшее проникновение снежинок размером 0,5 мм любой формы отмечается на втором (среднем) ярусе КВОУ.

Снежинки размером 1,0 мм по мере их утяжеления (изменения формы) начинают превалировать на нижнем (вход 1) всасе КВОУ. Эта тенденция сохраняется при увеличении их размера вплоть до 2,0 мм для пластин и звездообразных снежинок. Снежинки нестандартной формы этого размера из-за своей тяжести уже не поступают на нижний всас воздухоза-

бора. Относительная величина проникновения пластин и звездообразных снежинок размером 0,5 мм на верхнем ярусе КВОУ по величине проникновения находится в промежутке между средним и нижним ярусом. С увеличением размера всех форм снежинок до 1,0 мм на верхний ярус КВОУ поступает наименьшее их количество вплоть до 0.

Представим аналогичные зависимости, полученные в результате расчета для расхода воздуха 65 кг/с на *рис. 2.19–2.21.* Тенденции распределения пластинок и звездных снежинок размера 0,5 мм по ярусам КВОУ для расхода воздуха 65 кг/с остаются те же, что и для расхода 130 кг/с. Наибольшее количество снежинок поступает в погодные козырьки второго яруса КВОУ. При этом в процентном соотношении количество пластин, проникающих во второй ярус КВОУ при расходе 130 кг/с, в 3 раза превышает количество аналогичных снежинок при расходе 65 кг/с. На верхнем ярусе КВОУ таких снежинок уже в 4 раза больше при расходе 130 кг/с. Начиная с размера 1,0 мм и более обе формы снежинок на всас КВОУ не поступают.

Снежинки нетрадиционной формы ни одного из расчетных размеров на всас КВОУ (в погодные козырьки) не поступают (*рис. 2.21*).

В результате выполненных расчетов установлено, что при

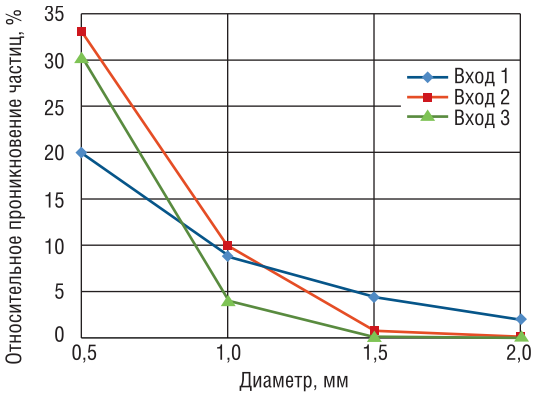


Рис. 2.16. Проникновение снежинок в форме пластин на всас КВОУ по ярусам

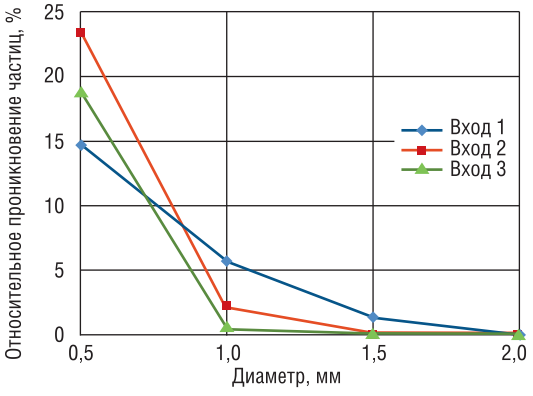


Рис. 2.17. Проникновение звездообразных снежинок на всас КВОУ по ярусам

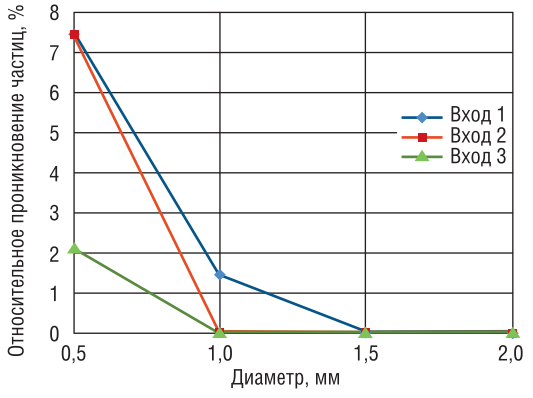


Рис. 2.18. Проникновение снежинок нестандартной формы на всас КВОУ по ярусам

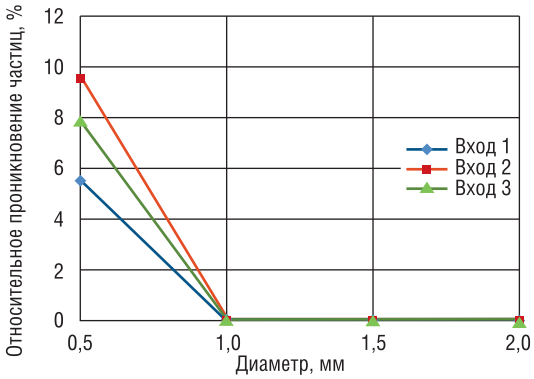


Рис. 2.19. Проникновение снежинок в форме пластин на всас КВОУ по ярусам

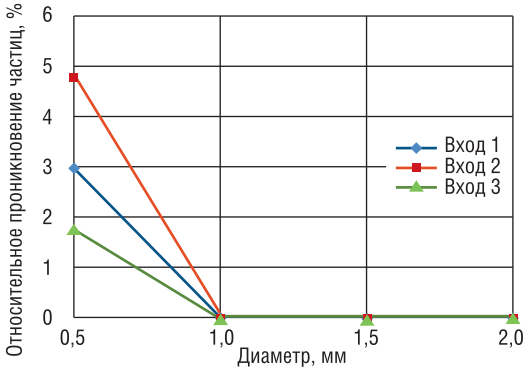


Рис. 2.20. Проникновение звездообразных снежинок на всас КВОУ по ярусам

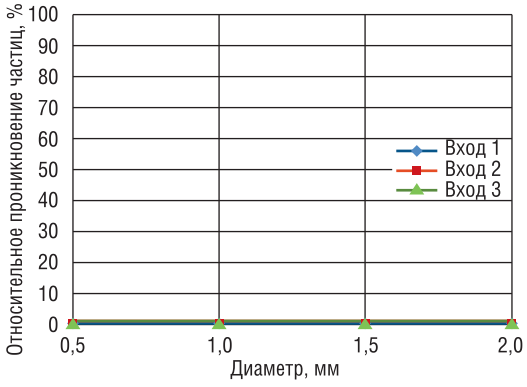


Рис. 2.21. Проникновение снежинок нестандартной формы на всас КВОУ по ярусам

уменьшении расхода воздуха в два раза количество снежинок, поступающих на всас КВОУ, резко снижается.

На *рис. 2.22* представлены сравнительные графики относительного проникновения пластин, звездообразных и нестандартной формы снежинок по размерам на верхний ярус КВОУ ГТУ при скорости воздуха 31 м/с.

Наибольшее проникновение в погодный козырек верхнего яруса КВОУ отмечается снежинками всех размеров в виде пластин. Звездообразные снежинки размером 0,5–1,0 мм также активно поступают в этот погодный козырек. При возрастании размеров с 1,5 до 2,0 мм интенсивность проникновения этих снежинок резко снижается и становится соизмерима с количеством нестандартных снежинок размером 1,0 мм. Траектории движения нестандартных снежинок в воздухе не имеют ярко

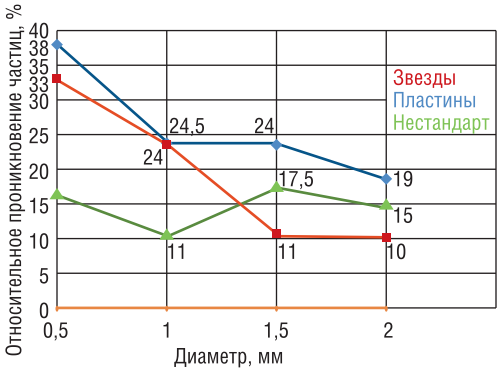
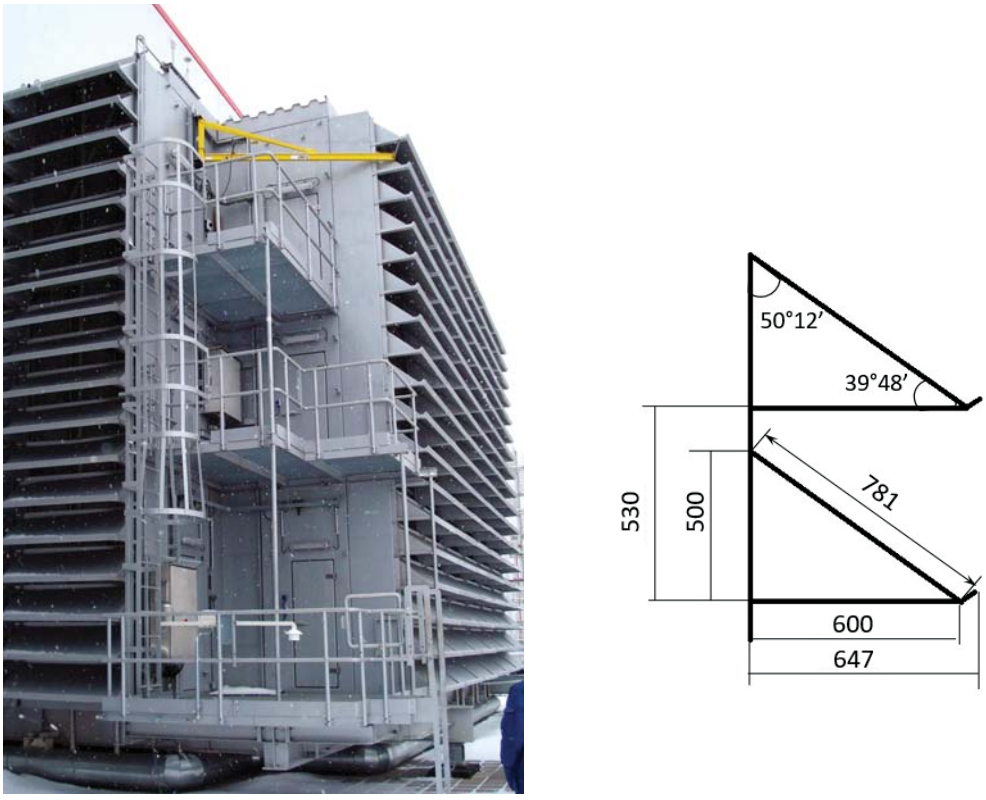


Рис. 2.22. Графики проникновения снежинок на верхний ярус КВОУ

выраженного однозначного характера в зависимости от их размера, поэтому наибольшее количество этих снежинок попадает в погодный козырек верхнего яруса при размерах 1,5 мм. При этом снежинки размером 0,5 и 2,0 мм также активно участвуют в этом процессе. В погодные козырьки нижнего и среднего всаса КВОУ снежинки этих форм и размеров не попадают (оранжевая линия). Из расчетов видно, насколько эффективно снижают проникновение снежинок различных форм и размеров погодные козырьки КВОУ ГТУ длиной 1,7 м, установленные под углом 45°.

2.1.2. Концепции выбора погодных козырьков

Различные производители ВЗТ используют собственную концепцию в оснащении погодными козырьками КВОУ ГТУ. На *рис. 2.23* изображено типичное КВОУ компании Camfil Farr (Швеция) для ГТЭ-160 с погодными козырьками длиной 647 мм. По мнению производителя, небольшой размер погодных козырьков будет компенсирован их увеличенным количеством, позволяющим предотвратить попадание атмосфер-



а) *б)*

Рис. 2.23. КВОУ Camfil Farr: а) погодные козырьки; б) размеры погодных козырьков

Рис. 2.24. Проникновение снежинок в КВОУ ГТУ

ных осадкой в виде дождя и снега в КВОУ ГТУ. Вероятно, такой подход к проектированию погодных козырьков КВОУ мог бы быть целесообразным для регионов с малым количеством атмосферных осадков и снеговой нагрузкой. В случае с Москвой и Московской областью такой подход себя не оправдал. На *рис. 2.24* показано интенсивное проникновение снежинок через эти погодные козырьки в систему фильтрации циклового воздуха КВОУ ГТУ.

На *рис. 2.25* изображены КВОУ ГТУ LM 6000 со снеговыми козырьками длиной более трех метров для электростанции морского базирования в Северной Норвегии [7]. Отличие двух подходов производителей ВЗТ к предотвра-

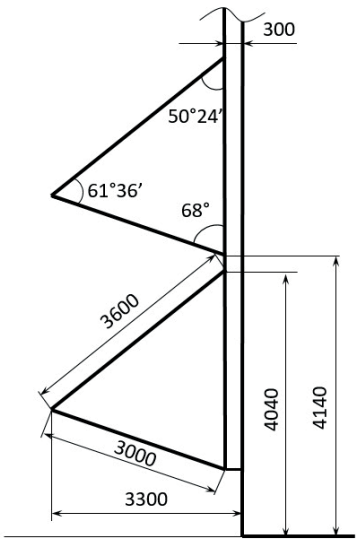
Рис. 2.25. КВОУ ГТУ LM6000 со снеговыми погодными козырьками

щению попадания атмосферных осадков в КВОУ ГТУ с помощью погодных козырьков очевидно. Одна компания учитывает климатические условия эксплуатации своего оборудования, другая пользуется уже отработанными ранее проектами и технологиями для любых регионов мира. Необоснованные технические решения при оснащении КВОУ теми или иными погодными козырьками оказывают существенное влияние на результаты эксплуатации системы фильтрации циклового воздуха КВОУ и эффективность выработки электроэнергии ГТУ.

Некоторые производители ВЗТ для снижения попадания атмосферных осадков в виде дождя на воздушные фильтры по всей высоте КВОУ устанавливают водостоки (*рис. 2.26*).

Атмосферная влага стекает с погодных козырьков в желоба системы дренажа и по локальным трубам на каждом ярусе КВОУ направляется в общий водосток дренажной системы ВЗТ. Безусловно, такой подход позитивно сказывается на минимизации поступления атмосферной влаги в систему фильтрации циклового воздуха ГТУ. Воздушные фильтры меньше намокают, тем самым уменьшается рост перепада давления на них, а следовательно, увеличивается выработка электроэнергии ГТУ. На *рис. 2.23б* также видны небольшие желоба для сбора атмосферной влаги, однако там отсутствуют трубы отвода влаги от погодных козырьков, в результате чего происходит переполнение желобов водой, и она начинает поступать на всас КВОУ. В условиях зимней эксплуатации желоба и вся система водостока заполняются снегом и замерзают (*рис. 2.27а*). В случае знакопеременных температур, а также ледяного дождя на погодных козырьках и водостоках образуются наледи в виде сосулек, что

а)



б)

Рис. 2.26. КВОУ компании FAIST AIS (ФРГ):
а) погодные козырьки;
б) размеры погодных козырьков

создает опасность как для обслуживающего персонала ГТУ, так и для воздушных фильтров КВОУ (*рис. 2.27б*).

В соответствии с документом «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок» РАО «ЕЭС России», «конструкция КВОУ должна исключать образование наледей и сосулек». Исходя из этого требования, проектанты и изготовители КВОУ должны предусматривать для водостоков и дренажа на погодных козырьках системы их обогрева, поскольку очистить их ото льда и снега в процессе эксплуатации практически невозможно из-за конструктивных особенностей КВОУ ГТУ.

а)

б)

Рис. 2.27. КВОУ с водостоком на погодных козырьках: а) занос снегом; б) обледенение

Рассмотрим пример влияния погодных козырьков КВОУ на систему фильтрации циклового воздуха энергетической ГТУ. По плану реконструкции ВЗТ с односторонним всасом ГТЭ-160 26.05.2020 были сняты погодные козырьки КВОУ (*см. рис. 2.26б*). Накануне даты снятия погодных козырьков с КВОУ были выполнены замеры загрязненности воздуха на всасе ВЗТ ГТУ. Процентное распределение частиц по высоте КВОУ представлено на *рис. 2.28*.

Как видно из этих зависимостей, наибольшее количество частиц пыли было зафиксировано на втором (среднем) ярусе КВОУ. Многолетний мониторинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ показал постоянство картины распределения частиц пыли перед воздухозаборным устройством ГТУ. После снятия погодных козырьков и выполнения сопутствующих этому работ продолжился

поярусный мониторинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ.

На *рис. 2.28* изображены результаты анализа замеров загрязненности воздуха за 28.05.2020. Как видно из приведенной зависимости относительного количества пыли от высоты замера, наибольшей запыленности воздуха подвержены фильтры первого (нижнего) яруса, а наименьшей загрязненности – фильтры второго (среднего) яруса КВОУ. Другими словами, картина распределения пылевой нагрузки на фильтры по высоте КВОУ поменялась на противоположную.

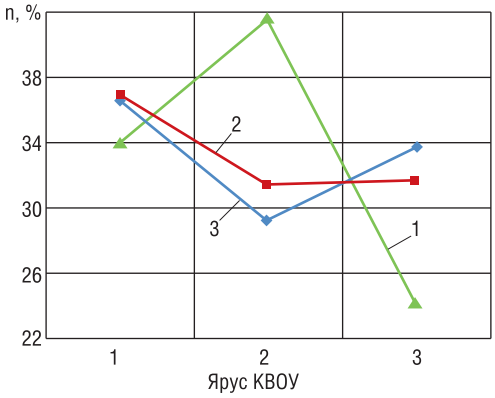


Рис. 2.28. Распределение взвешенных частиц в атмосферном воздухе по ярусам КВОУ: 1 – 25.05.2020; 2 – 29.05.2020; 3 – 28.05.2020

Следует отметить, что май 2020 г. в Москве (https://www.m24.ru/news) стал рекордно дождливым за всю историю метеонаблюдений, хотя согласно многолетним статистическим данным Гидрометцентра наиболее дождливым месяцем в столице является июль. Суммарное количество осадков в мае (свыше 155 мм) втрое превысило климатическую норму (51 мм) и побило рекорд, установленный в 1933 г. (132 мм). 29 мая выпало рекордное за 140 лет количество осадков для этого дня – 37,3 мм. «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 тогда представитель метеослужбы.

На *рис. 2.28* приведено распределение количества частиц в кубометре атмосферного воздуха по ярусам КВОУ за 29.05.2020. Как и в предыдущий день, тенденция распределения относительного количества частиц по высоте КВОУ не изменилась, хотя в абсолютном значении 29.05.2020 было зафиксировано шестикратное увеличение количества аэрозолей. Обращает на себя внимание факт полного совпадения относительных показателей загрязненности воздуха на первом ярусе КВОУ в различных климатических условиях 28 и 29 мая 2020 г. Результаты мониторинга атмосферного воздуха на всасе КВОУ в последующие дни подтвердили зафиксированные тенденции, выявленные после снятия погодных козырьков.

Как же отразились такие экстремальные климатические условия на работе фильтров воздухозаборного устройства ГТУ при отсутствии погодных козырьков КВОУ?

В *табл. 2.2* и *2.3* представлены перепады давления на фильтрах-коагуляторах карманного типа класса G4, установленных на первой ступени фильтрации, фильтрах средней очистки карманного типа класса M5 и кассетных фильтрах тонкой очистки класса F9, размещенных соответственно на второй и третьей ступенях КВОУ. Фиксацию показаний датчиков давления на фильтрах выполняли с момента начала дождя 29 мая через каждые 5–7 ч эксплуатации ГТУ.

Перепады давления на фильтрах КВОУ во время дождя 29.05.2020 ***Таблица 2.2***

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	63	69	86

Перепады давления на фильтрах КВОУ во время дождя 30.05.2020 ***Таблица 2.3***

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	63
12:00	1	277	97	83
	2	56	89	96
	3	59	73	96
19:00	1	236	101	84
	2	65	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. 2.28* за 29.05.2020. 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. Это 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 ступени (средней и тонкой очистки). При намокании фильтровального материала эффективность улавливания пыли резко снижается и становится соизмеримой с эффективностью фильтра с более низким классом очистки.

По мере роста температуры наружного воздуха 29.05.2020 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. 2.28*.

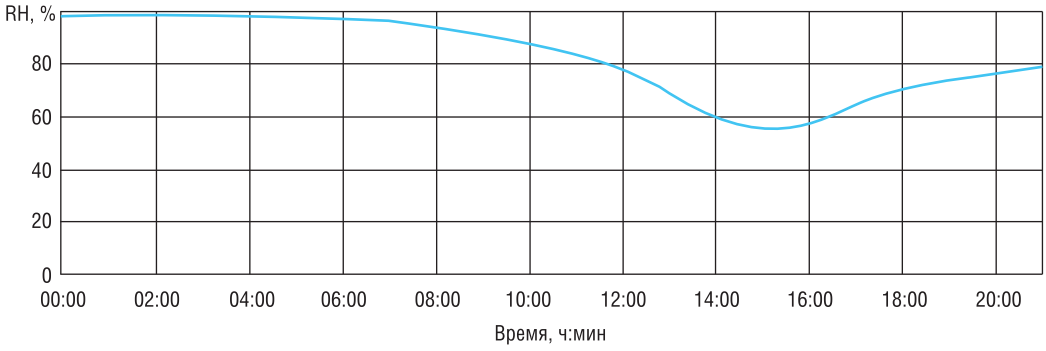
30.05.2020 характер погоды не изменился. Архив погоды в Москве так характеризует ночь этих суток: сплошная облачность без просветов, дымка, ***очень сильный ливневый дождь***, облачность более 5 баллов, ***ливневые осадки***, атмосферное давление ниже нормы, температура воздуха +13...+14 °С, ветер северо-восточный 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 ч 30.05.2020 произошел резкий скачок давления на фильтрах-коагуляторах нижнего яруса КВОУ. За 17 ч работы КВОУ с момента начала дождя 29.05.2020 перепад давления на фильтрах-коагуляторах первого (нижнего) яруса вырос на 391 Па, или более чем в 5,8 раза. Это значение хорошо согласуется с зафиксированным в процессе мониторинга атмосферного воздуха шестикратным увеличением количества аэрозолей в этот день. Для оценки последствий такого явления необходимо помнить, что увеличение перепада давления в КВОУ на 50 Па приводит в среднем к снижению выработки электроэнергии ГТУ на 0,1 %.

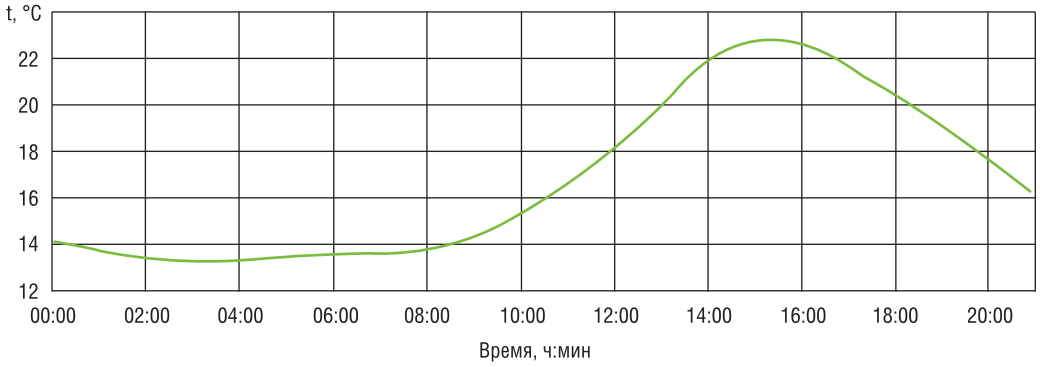
Почему же перепад давления на фильтрах первой ступени очистки атмосферного воздуха так резко увеличился, а на остальных ярусах снизился? По нашему мнению, на это повлияли два фактора: один природный, другой технический. Под воздействием интенсивных атмосферных осадков произошло трансформирование обычного (типового для данного места) фона распределения загрязнений по высоте КВОУ ГТУ.

Технический фактор – это конструкция воздухозаборного тракта ГТУ. Первый ярус КВОУ соосен с горизонтальным воздуховодом тракта подвода воздуха к ГТУ и, следовательно, не отраженная погодными козырьками атмосферная влага устремляется в это сечение.

На *рис. 2.29* 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 два 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. 2.29. Тренды изменения параметров атмосферного воздуха 30.05.2020: а) относительной влажности; б) температуры (http://meteoinfo.ru)

Воздушные фильтры на КВОУ ГТУ заменяются при достижении предельно-допустимого перепада давления. Для фильтров грубой очистки класса G4, в нашем случае фильтров-коагуляторов, этот перепад составляет 250 Па согласно ГОСТ Р ЕН 779:2014. При базовой комплектации датчики давления на фильтрах были установлены только на первом

ярусе КВОУ. Тогда, исходя из требования этого ГОСТа, все фильтры-коагуляторы, установленные на трех ярусах КВОУ, должны были быть заменены при достижении этого давления. В результате 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.

Таким образом, погодные козырьки КВОУ оказывают существенное влияние на защиту воздушных фильтров от атмосферных осадков в виде снега и дождя. Снятие или отсутствие погодных козырьков может привести к изменению распределения количества жидких аэрозолей по ярусам КВОУ, росту перепадов давления на воздушных фильтрах и, как следствие, снижению выработки электроэнергии ГТУ.

2.2. Противомоскитные сетки

Для очистки циклового воздуха энергетических ГТУ от двукрылых насекомых, плодов цветения растений, от птиц и мусора применяются два вида сеток: противомоскитные и защитные от птиц и мусора. Существенное влияние на жизненный цикл воздушных фильтров, обеспечивающих очистку циклового воздуха ГТУ от загрязнений, оказывают двукрылые насекомые. Концентрация этих насекомых бывает настолько велика, что фильтрующие элементы, установленные на всасе двигателей 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 турбомашины. На *рис. 2.30* показаны размеры останков насекомых, снятых с лопаток компрессора ГТЭ-20С [8].

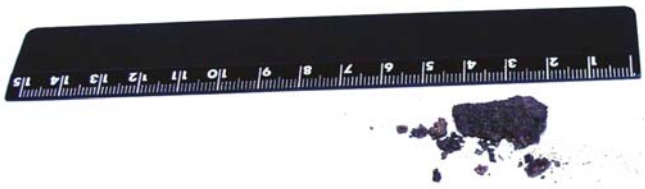


Рис. 2.30. Биомасса насекомых, снятая с лопаток компрессора ГТЭ-20С

Размеры ячеек этих сеток определяются минимальными размерами насекомых так, чтобы предотвратить их проникновение в систему фильтрации. В работе [9] приведены размеры двукрылых насекомых, которые представляют практический интерес для разработки устройств, защищающих от них персонал электростанций и воздушные фильтры КВОУ ГТУ.

Поскольку в странах с жарким и влажным климатом зимы в нашем понимании не бывает, защитные сетки к КВОУ крепятся с помощью стационарных металлических конструкций каркаса (*рис. 2.31*). Безусловно, качество металла, используемого в данной конструкции, при высокой влажности окружающей среды должно исключать возможность его ржавления и создания дополнительного источника загрязнения фильтров частичками коррозионного металла. Защитная сетка обычно изготавливается из синтетических волокон повышенной прочности. Нередко она пропитывается специальным раствором, отпугивающим насекомых. Поскольку наибольшую проблему для людей и животных представляют москиты, сетки, используемые для защиты от них, называются противомоскитными.

Если ГТУ располагается на площадке вблизи земли или на месте, где к противомоскитной сетке может быть доступ других животных, способных повредить ее, то перед ней на некотором расстоянии устанавливают металлическую защитную сетку (*рис. 2.32а*).

Рис. 2.31. Противомоскитная сетка на ТЭЦ ГТУ в Бангкоке (Таиланд) [9]

Каркас такой конструкции должен обеспечивать не только надежность крепления обеих защитных сеток, но и защиту от ветровых и сейсмических (при необходимости) нагрузок, чтобы не повредить двигатель. Опыт применения защитных сеток от насекомых в странах с жарким и влажным климатом может быть использован и на отечественных электростанциях, эксплуатирующих ГТУ (*рис. 2.32б*).

а) *б)*

Рис. 2.32. Защитная сетка перед КВОУ ГТУ: а) в Бангладеш [9]; б) на ТЭЦ ГСР Энерго

В отличие от этих климатических регионов, активная фаза жизнедеятельности насекомых в нашей стране носит сезонный характер, поэтому создание тяжелых стационарных конструкций противомоскитной защиты для ГТУ не имеет смысла. Это должны быть прочные, но разборные конструкции, надежные в эксплуатации и удобные в хранении. Эти же конструкции с успехом могут применяться для защиты систем фильтрации циклового воздуха ГТУ от сезонного воздействия одуванчиков и тополиного пуха, оказывающих значительное влияние на работу всех технических средств. Особенно подвержены воздействию тополиного пуха такие большие города, как Москва и Санкт-Петербург.

В документе «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок» сетки от насекомых включены в перечень комплектации КВОУ. Несмотря на это, в технических заданиях на изготовление и поставку КВОУ для энергетических ГТУ для отечественных ТЭЦ требование наличия противомоскитной защиты отсутствовало. На энергетические объекты нашей страны для блоков ПГУ стали поставляться КВОУ без штатной противомоскитной защиты. Поставляемые КВОУ состояли в основном из трех ступеней очистки циклового воздуха ГТУ: коагуляторов (влагоотделителей), фильтров грубой и фильтров тонкой очистки. В ходе уже первого года эксплуатации этих КВОУ был отмечен рост перепада давления на воздушных фильтрах в весенне-летний период. Во время цветения растений, появления тополиного пуха, одуванчиков, насекомых в воздушных фильтрах и КВОУ обнаруживалось большое количество этих отложений (*рис. 2.33*). Электростанции с ПГУ стали нести дополнительные финансовые потери, обусловленные снижением мощности ГТУ из-за повышенного перепада давления на

а)

б)

Рис. 2.33. Насекомые: а) в КВОУ; б) в фильтрах тонкой очистки

фильтрах КВОУ. С целью выполнения графика электрической нагрузки системного оператора оперативному персоналу блоков ПГУ пришлось увеличивать расход топливного газа для поддержания необходимой мощности ГТУ.

Кроме того, снизился срок жизненного цикла фильтров КВОУ и увеличилась частота их замены по достижению предельного перепада давления. После этого в технических заданиях и технических требованиях к КВОУ появилось указание о комплектации его штатными противомоскитными сетками.

Только на относительно новых КВОУ предусмотрена штатная четвертая (сезонная) ступень очистки – противомоскитные сетки, используемые в весенне-летний период эксплуатации ГТУ (*рис. 2.34а*). Эти металлические сетки устанавливаются на штатные места за погодными козырьками КВОУ. Такое размещение позволяет им обеспечить защиту теплообменного аппарата системы АОС и установленных за ним фильтров первой ступени от тополиного пуха и двукрылых насекомых (*рис. 2.34б, в*). Штатные противомоскитные сетки показали высокую эффективность задержания насекомых, пыльцы цветов и растений и особенно тополиного пуха [10]. Для повышения эффективности работы системы фильтрации циклового воздуха ГТУ, снижения перепада давления на фильтрах КВОУ и расхода топливного газа в ПАО «Мосэнерго» были выработаны технические решения по установке противомоскитных сеток на воздухозаборные тракты, не оснащенные штатными сетками.

а)

б)

в)

Рис. 2.34. Штатные противомоскитные сетки:
а) чистые; б) в тополином пуху; в) покрытые бабочками

Технические решения учитывали особенности конструкции КВОУ и их размещения на блоках ПГУ. Несколько КВОУ установлены на крыше здания блоков ПГУ, что позволяет с помощью металлических консолей закрепить синтетические противомоскитные сетки перед тремя всасами воздухозаборного тракта ГТУ (*рис. 2.35а*). Для предотвращения подсоса неочищенного атмосферного воздуха и усиления прочности противомоскитной сетки ее боковые поверхности оснащены прочной воздухонепроницаемой тканью. Такое размещение КВОУ позволяет очищать противомоскитные сетки при их снятии прямо на крыше машинного зала ПГУ.

Другие КВОУ установлены консольно на здании блоков ПГУ, при этом сервисные дорожки перед погодными козырьками КВОУ отсутствуют. В этом случае установка и обслуживание противомоскитных сеток перед всасами КВОУ становится трудновыполнимой задачей. Кроме того, доступ к первой ступени фильтрации атмосферного воз-

духа возможен только со стороны выхода воздуха из фильтров-коагуляторов.

Если перед ними установлены жалюзи влагоотделения и форсунки распыла горячего воздуха противообледенительной системы, то синтетические противомоскитные сетки устанавливаются на фильтры второй ступени КВОУ. Как видно на *рис. 2.35б*, противомоскитная сетка, установленная на комбисистему, состоящую из фильтра грубой и тонкой очистки, эффективно защищает эти фильтр-элементы от двукрылых насекомых.

а)

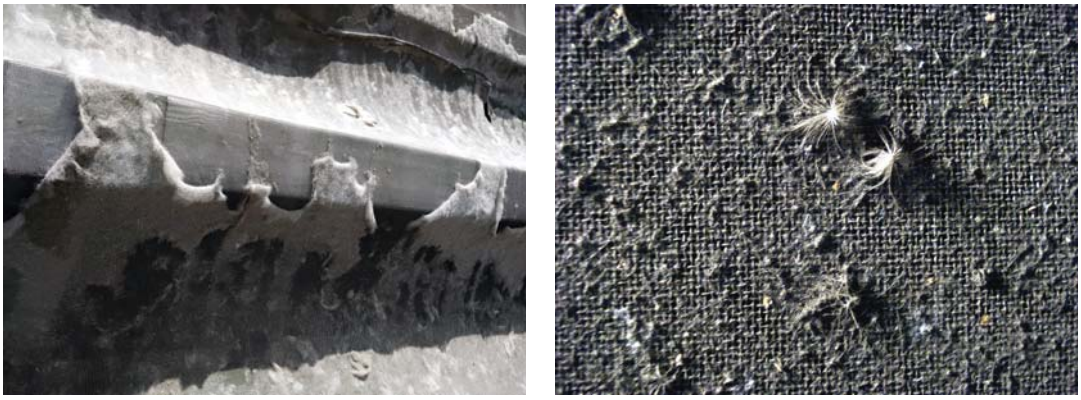
б)

Рис. 2.35. Нештатные противомоскитные сетки: а) на КВОУ; б) на фильтрах

Особенности размещения блока ПГУ и всасов КВОУ существенно влияют на тип и интенсивность загрязнения противомоскитных сеток. В случае размещения блока ПГУ рядом с лесным или жилым массивом, где произрастает большое количество тополей, в определенный период времени будет наблюдаться большая концентрация тополиного пуха в атмосферном воздухе, что мгновенно отразится на противомоскитных сетках КВОУ (*рис. 2.36а*). А при расположении блока ПГУ внутри обширной индустриальной зоны или рядом с оживленной автомобильной трассой, на противомоскитных сетках КВОУ помимо двукрылых насекомых и одуванчиков наблюдаются отложения несгоревших углеводородов (*рис. 2.36б*).

В этом случае противомоскитные сетки покрываются маслянистой пленкой, хорошо удерживающей другие отложения на своей поверхности. Очистка противомоскитных сеток от такого рода отложений становится непростой задачей.

На *рис. 2.37* представлен тренд роста перепада давления на штат-



а) *б)*

Рис. 2.36. Интенсивность заноса противомоскитных сеток:
а) тополиным пухом; б) несгоревшими углеводородами и одуванчиками

ных противомоскитных сетках КВОУ ГТУ, расположенного в жилом массиве в центре Москвы, в течение 18 июня 2018 года. С момента начала набора мощности блока ПГУ до начала его разгрузки (за 18 часов 17 минут работы) перепад давления на противомоскитных сетках вырос с 0,5 до 1,5 мбар.

Другими словами, рост перепада давления составил 100 Па. Как известно, увеличение перепада давления на 50 Па на фильтрах КВОУ ведет к снижению выработки электроэнергии ГТУ в среднем на 0,1 % [4]. Таким образом, можно оценить влияние тополиного пуха на выработку электроэнергии (расход топливного газа для компенсации потерь мощности) ГТУ в течение одних суток.

Способ, частота и продолжительность очистки противомоскитных сеток зависят от погодных условий, конструкции КВОУ (наличия сервисных

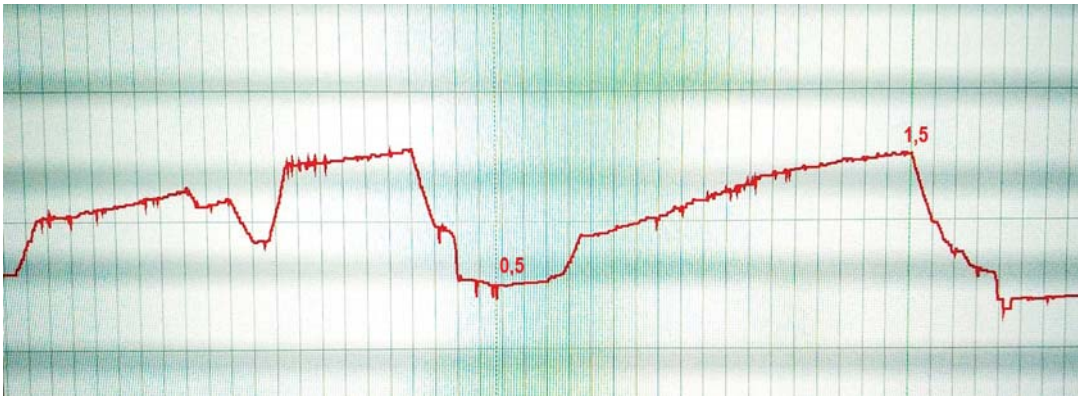


Рис. 2.37. Тренд роста перепада давления
на штатных противомоскитных сетках 18.06.2018

дорожек и доступности к сеткам), типа противомоскитных сеток (штатные или нештатные), вида и интенсивности загрязнения противомоскитных сеток (только тополиным пухом и насекомыми или тополиным пухом и несгоревшими углеводородами), вида очистки (ручная или техническими средствами), количества и типа (производительности) пылесосов, возможности размещения их в месте очистки, наличия отработанных методик очистки сеток от различных видов загрязнений, подготовленности персонала. В *табл. 2.4* представлена статистика очистки штатных противомоскитных сеток на КВОУ работающих ГТУ в период пиковой фазы цветения растений (май–июнь) 2018 года.

Следует отметить, что статистика очистки противомоскитных сеток в тот же самый период времени 2017 года кардинально отличается от 2018 года. Весна и лето 2017 года в Москве характеризовались пониженной температурой и дождливой погодой. В результате этого острой фазы цветения растений не наблюдалось и значительных отложений на противомоскитных сетках не фиксировалось. В мае–июне 2018 года температура наружного воздуха превышала нормативные показатели на несколько градусов, в Москве установилась сухая и солнечная погода, что способствовало бурному росту и цветению растений. Это сразу же отразилось на заносе противомоскитных сеток тополиным пухом и росте перепада давления на них (*см. рис. 2.36а*).

Заметим, что три ТЭЦ, о которых идет речь в таблице, находятся в центральной части столицы. Расстояние между ТЭЦ в Северо-Западном административном округе (СЗАО) и ТЭЦ в Юго-Западном административном округе (ЮЗАО) по прямой 8 км, а между ТЭЦ в ЮЗАО и ТЭЦ в Западном административном округе (ЗАО) всего 4 км. Эта информация будет интересна при сравнении количества очисток противомоскитных сеток на КВОУ рядом расположенных ТЭЦ. КВОУ, перечисленные в *табл. 2.4*, имеют разное количество всасов и противомоскитных сеток.

Конструкции КВОУ в СЗАО и в ЮЗАО идентичны, в отличие от КВОУ ЗАО, которое установлено консольно на здании блока ПГУ. В результате этого доступ к противомоскитным сеткам со стороны всаса КВОУ отсутствует. Чтобы очистить противомоскитные сетки в процессе работы ГТУ, необходимо изнутри КВОУ первоначально снять один карманный фильтр-коагулятор, затем противомоскитную сетку. Через образовавшийся лаз нужно проникнуть в зазор между жалюзи каплеуловителей за погодными козырьками КВОУ и штатным местом установки противомоскитных сеток. В этом же пространстве перемещается пылесос, с помощью которого осуществляется очистка противомоскитных сеток без их снятия. Процедура повторяется на каждом из трех ярусов КВОУ.

Статистика очистки противомоскитных сеток на КВОУ, работающих в 2018 г. ***Таблица 2.4***

ТЭЦ	Конструктивные особенности КВОУ и количество сеток	Количество очисток сеток по месяцам		Примечание
		Май	Июнь	
СЗАО	Три всаса, три яруса, 540 шт.	6	7	Очистка пылесосом оказалась неэффективной, поэтому она осуществлялась щетками бригадой из 4–5 человек. На очистку сеток на всех всасах и ярусах КВОУ затрачивалось 8 часов. Перепад давления после очистки сеток снижался в среднем на 0,4 мбар.
ЮЗАО	Три всаса, три яруса, 540 шт.	7	12	Очистка на всех всасах и ярусах КВОУ производилась бригадой из 4 человек двумя пылесосами за 4 часа в ночное время (во время разгрузки блока ПГУ). Перепад давления снижался с 1,2 до 0,6 мбар. Один раз сетки мылись водой с помощью пылесоса для снятия с них масляной пленки.
ЗАО	Один всас, три яруса, 480 шт.	ремонт	6	Очистка сеток осуществлялась поярусно: за первые две недели – 4 раза на нижнем ярусе (2 раза в неделю), в третью неделю – 1 раз в среднем ярусе, в последнюю неделю – 1 раз на всех ярусах одним пылесосом в течение 5 часов бригадой из 2 человек. Перепад давления снизился с 1,5 до 0,5 мбар.

КВОУ в СЗАО и ЮЗАО имеют конструктивный доступ к противомоскитным сеткам со стороны всаса воздуха, что значительно упрощает процедуру очистки сеток. Как следует из примечания *табл. 2.4*, даже на КВОУ одинаковой конструкции частота и способы очистки противомоскитных сеток различаются. Эти отличия обусловлены местом расположения блока ПГУ ТЭЦ. Приведенные данные показывают, что очистка сеток с помощью пылесосов занимает меньше времени, чем ручная тем же самым количеством людей. В случае необходимости (для снижения перепада давления) очистка противомоскитных сеток может осуществляться по конкретным ярусам или всасам КВОУ, исходя из визуального контроля их наибольшей загрязненности.

Очистка нештатных синтетических противомоскитных сеток, установленных на всасе (всасах) КВОУ и на фильтрах второй ступени очистки воздуха, осуществляется после их полного снятия. Даже при наличии

двух комплектов противомоскитных сеток фильтры КВОУ остаются незащищенными в течение нескольких часов.

Очевидно, что очистку противомоскитных сеток по многим соображениям лучше осуществлять во время останова ГТУ. Однако безусловное выполнение графика нагрузки системного оператора накладывает свои обязательства на работу блоков ПГУ.

На *рис. 2.38* представлено техническое решение, позволяющее обеспечивать очистку ***нештатных*** противомоскитных сеток при работающей ГТУ и постоянной защите воздушных фильтров КВОУ от двукрылых насекомых и продуктов цветения растений. Такая конструкция очистки нештатных противомоскитных сеток наиболее целесообразна для КВОУ ГТУ, имеющих небольшие погодные козырьки или при их отсутствии (*см. рис. 2.35а*).

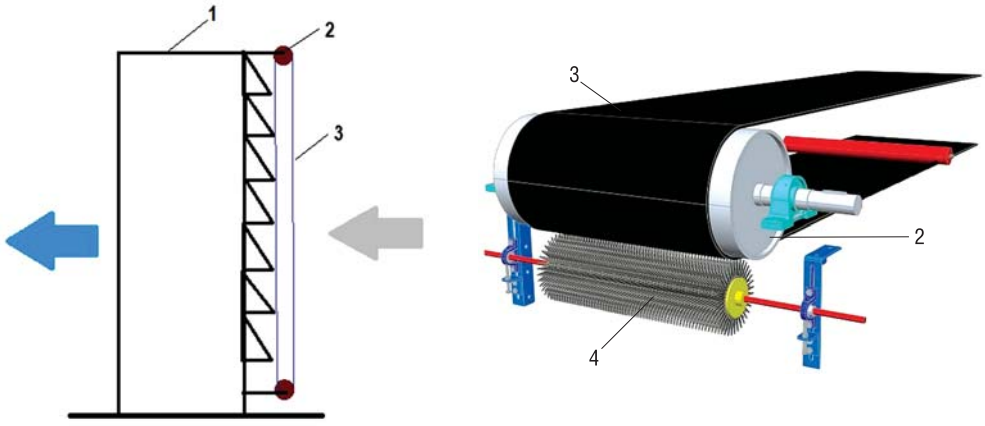


Рис. 2.38. Техническое решение
по установке нештатных противомоскитных сеток [9]:
1 – КВОУ; 2 – барабаны; 3 – двухсторонняя противомоскитная сетка; 4 – щетка

Конструктивно устройство состоит из двух барабанов (*2*), на которых закреплена двухстороння противомоскитная сетка (*3*). Барабаны, один из которых имеет привод, крепятся на верхнем и нижнем ярусах КВОУ. Принцип работы устройства заключается в следующем: в процессе эксплуатации ГТУ лицевая часть противомоскитной сетки загрязняется. Для ее очистки нижний барабан приводится в движение с помощью механического привода (ручного или электрического). По мере очистки лицевой части сетки щеткой (*4*) или пылесосом ее обратная (чистая) сторона устанавливается в рабочее положение.

Таким образом, устраняются недостатки существующих способов защиты КВОУ от двукрылых насекомых и продуктов цветения растений:

– обеспечивается постоянная защита системы фильтрации КВОУ ГТУ в процессе работы и очистки противомоскитных сеток, чем увеличивается жизненный цикл воздушных фильтров и снижаются финансовые затраты на их закупку;

– установленная под погодным козырьком противомоскитная сетка не подвержена ветровым нагрузкам, поэтому срок ее службы увеличивается, что снижает финансовые затраты на закупку и изготовление сеток;

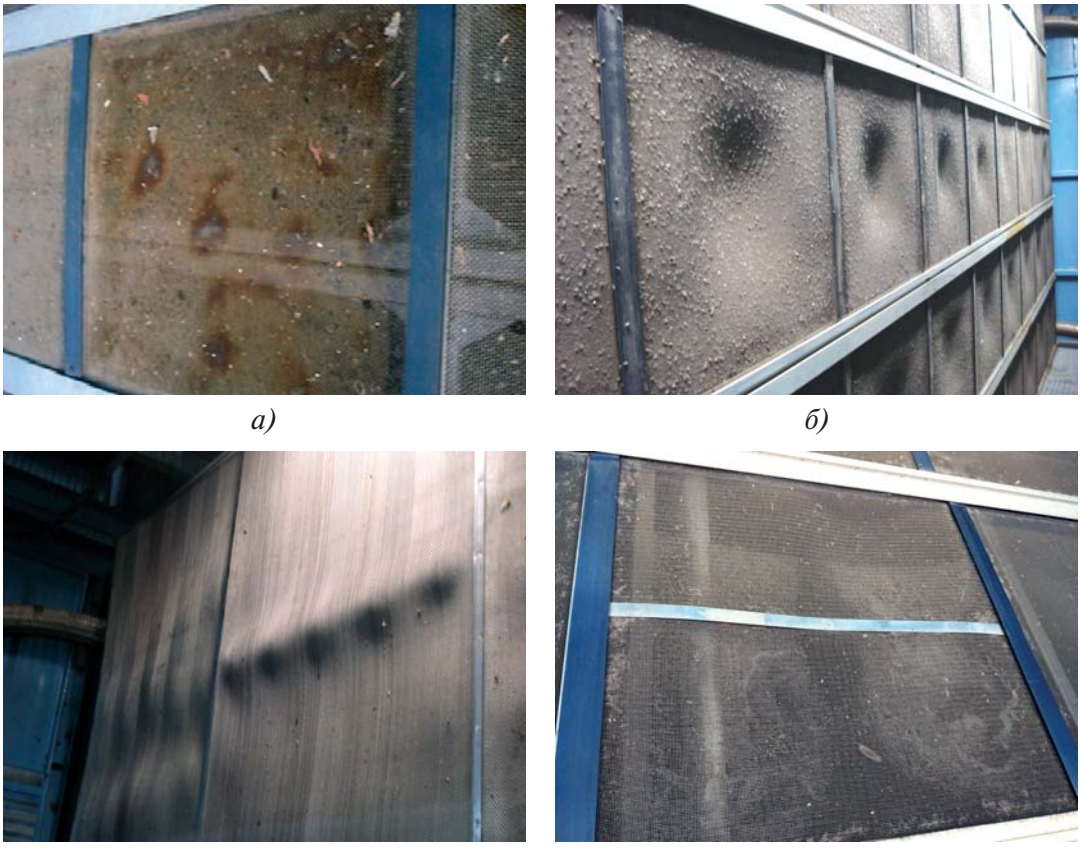
– установка противомоскитных сеток на КВОУ и их очистка с помощью предлагаемого устройства значительно уменьшает трудозатраты на выполнение этих процедур (может выполняться одним человеком).

Как уже отмечалось, противомоскитные сетки рекомендуется применять в КВОУ ГТУ только в весенне-летний период. Однако, как показал опыт эксплуатации, такие сетки показали свою эффективность и осенью (до первых заморозков) во время интенсивного листопада. Но попытка использовать их в зимнее время (или просто забыли их снять) приводила к большим проблемам (*рис. 2.39*). На *рис. 2.39а* зафиксирована ситуация, когда снег скопился между противомоскитной сеткой и панельным фильтром-коагулятором первой ступени на КВОУ ГТУ, расположенной в южных широтах. На *рис. 2.39б* показано полное обмерзание и блокирование противомоскитных сеток и всаса КВОУ ГТУ в северных широтах. Попытки очистить сетки с помощью щеток не привела к успеху, и, как следствие, эксплуатация ГТУ стала невозможной.

а) *б)*

Рис. 2.39. Последствия использования противомоскитных сеток зимой:
а) скопление снега между противомоскитной сеткой и фильтром;
б) обмерзание и блокирование противомоскитных сеток и всаса КВОУ [10]

Существенное влияние на срок службы противомоскитных сеток оказывает материал, из которого они изготовлены. Неметаллические сетки должны изготавливается из синтетических волокон повышенной прочности. Материал металлических противомоскитных сеток, как отмечалось ранее, должен противостоять коррозии. Если это не учтено, то через некоторое время эксплуатации сетка начинает корродировать (*рис. 2.40а*).



а) *б)*

в) *г)*

Рис. 2.40. Конструктивные неисправности противомоскитных сеток: а) ржавление металла; б), в) деформация металла; г) двойная сетка [9]

В ряде случаев для предупреждения коррозии противомоскитные сетки изготавливаются из алюминия. Однако, как известно, латунь, медь, алюминий пластичны и способны без разрушения получать большие остаточные деформации [11]. Это может привести к изменению формы и размеров противомоскитных сеток как под воздействием воздушного потока, так и в процессе их очистки (*рис. 2.40б*).

Следует избегать применения металлических противомоскитных сеток с увеличенной площадью фильтрации. На *рис. 2.38в* представлено со-

стояние противомоскитной сетки размером 1860×940 мм через несколько месяцев эксплуатации в КВОУ. Деформация (изгиб) металла обусловлена недостаточной жесткостью конструкции сетки. Для предотвращения деформации целесообразно применять дополнительную стяжку посередине конструкции (*рис. 2.40г*).

Другим конструктивным недостатком защиты от насекомых являются двухслойные металлические противомоскитные сетки (*рис. 2.41*). Попавших в зазор между двумя сетками двукрылых насекомых, а также тополиный пух, одуванчики и другие продукты цветения извлечь традиционным способом, как на однослойных сетках с помощью пылесоса, не удается. Требуется разборка, а затем сборка такой конструкции, что значительно усложняет и удлиняет по времени процедуру очистки противомоскитных сеток.

Увеличенное время очистки может стать определяющим на пике цветения растений, поскольку фильтры КВОУ, оставшиеся без этой ступени очистки атмосферного воздуха, быстро будут загрязняться.

В соответствии с ГОСТ Р ЕН 779-2014 и стандартом ISO 16890 противомоскитная сетка не может быть классифицирована как фильтр-элемент, поскольку эффективность воздушных фильтров определяется контрольной пылью. Частицы пыли, взвешенные в атмосферном воздухе, могут улавливаться противомоскитной сеткой в случае покрытия ее поверхности слоем тополиного пуха или двукрылыми насекомыми. Несмотря на это, компания Siemens AG рекомендует очищать сетки при достижении перепада давления на них, как для фильтров грубой очистки – 250 Па.

а)

б)

Рис. 2.41. Отложение загрязнений внутри двухслойных противомоскитных сеток: а) сетка в сборе; б) сетка разобрана

Опыт эксплуатации ГТУ показал, что наличие противомоскитных сеток полностью не решает задачу предотвращения попадания двукрылых насекомых в фильтры КВОУ. В КВОУ, установленных на крыше машинного зала блока ПГУ (*см. рис. 2.35а*), было зафиксировано проникновение большого количества двукрылых насекомых через отверстия системы дренажа атмосферных осадков. Для предотвращения этого явления в дренажную систему КВОУ были установлены невозвратно-запорные (обратные) клапаны.

Совокупность этих мероприятий позволила защитить фильтры КВОУ ГТУ от негативного воздействия двукрылых насекомых, тополиного пуха и цветения растений.

Резюме:

– эффективность улавливания и начальный перепад давления противомоскитных сеток зависят от размера ячеек сетки, а размер ячеек – от минимального размера двукрылых насекомых, обитающих в конкретном месте эксплуатации ГТУ;

– материал противомоскитных сеток должен быть износоустойчив в процессе эксплуатации и не подвергаться коррозии;

– противомоскитные сетки должны изготавливаться из твердых материалов, обладающих высокой прочностью (для сопротивления разрушению под действием напряжений, возникающих под воздействием внешних сил) и упругостью (для принятия первоначального положения после окончания воздействия различного вида воздействий);

– неметаллические противомоскитные сетки должны изготавливается из синтетических волокон повышенной прочности;

– компания Siemens AG рекомендует осуществлять очистку противомоскитных сеток при достижении перепада давления, как для фильтров грубой очистки – 250 Па;

– для снижения влияния тополиного пуха, двукрылых насекомых на выработку электроэнергии ГТУ рост перепада давления на противомоскитных сетках целесообразно не допускать выше 150 Па;

– частота, способ и продолжительность очистки противомоскитных сеток зависит от конструкции КВОУ, типа сеток, вида и интенсивности загрязнения, средств очистки, количества и типа пылесосов, наличия отработанных методик очистки сеток от различных видов загрязнений, подготовленности персонала;

– в весенне-летний период эксплуатации ГТУ для предотвращения проникновения двукрылых насекомых в воздушные фильтры помимо противомоскитных сеток необходимо установить невозвратно-запорные (обратные) клапаны в дренажную систему КВОУ;

– в осенне-зимний период эксплуатации КВОУ ГТУ противомоскитные сетки и обратные клапаны из дренажной системы должны сниматься;

– анализ эксплуатации КВОУ с противомоскитными сетками и без них показал, что срок службы фильтров первой ступени системы фильтрации циклового воздуха ГТУ увеличился на 2–3 месяца после применения противомоскитной защиты.

2.3. Защитные сетки от птиц и мусора

Защитные сетки от птиц в сельском хозяйстве применяются с незапамятных времен. Далеко не всегда удается защитить выращенный урожай от крылатых воришек, наносящих существенный материальный ущерб. Визуальные (пугала в виде хищных птиц) и звуковые имитаторы их криков часто неэффективны, поскольку умные летуны быстро понимают, что реальной угрозы они не несут. Оптимальной альтернативой в этом случае является защитная сетка, прочная и долговечная преграда.

В приложении к документу «Общие технические требования к системам фильтрации для энергетических газотурбинных установок» РАО «ЕЭС России» даны рекомендации по комплектации КВОУ энергетических ГТУ. В состав этого перечня включены и защитные сетки от птиц и мусора. Попадание их в воздухозаборное устройство 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 в теплообменный аппарат (систему антиайсинга) КВОУ снижается конвективный теплообмен между теплоносителем и обогреваемыми элементами. В результате этого в зимний период может возникнуть обледенение и занос снегом фильтров элементов, установленных в КВОУ ГТУ.

На КВОУ ГТУ ТЭЦ обычно установлены металлические защитные сетки от птиц и мусора с ячейкой 30×30 мм и толщиной прутка 1,5–3,0 мм. С нашей точки зрения, размер ячейки защитной сетки должен определяться минимальным размером наиболее часто встречающихся видов птиц в конкретном месте эксплуатации ГТУ. Наиболее распространенным пернатым в мире и нашей стране является домовой воробей. Согласно Википедии, длина тела самца воробья 147–180 мм, размах крыльев от 230 до 264 мм. Самки меньше: их длина 125–140 мм [10]. Таким образом, домовые воробьи не могут проникнуть через ячейки защитной сетки.

а)

б)

Рис. 2.42. Защитная сетка от птиц и мусора КВОУ ГТУ:
а) предотвращение попадания птицы;
б) загрязнение теплообменного аппарата мусором при повреждении сетки

Применение защитной сетки от птиц на КВОУ ГТУ предотвращает попадание пернатых в техническое оборудование (*рис. 2.42а*).

Помимо предотвращения попадания пернатых в работающие механизмы, защитные сетки задерживают различного рода мусор, поднимаемый в воздух порывами ветра. Если защитная сетка отсутствует или повреждена, то установленные за ней воздушные фильтры или теплообменный аппарат КВОУ ГТУ будут подвержены сильному загрязнению (*рис. 2.42б*).

Для предотвращения попадания мелкого мусора, проникающего через клетки сетки, а также двукрылых насекомых и плодов цветения растений, перед теплообменными аппаратами и фильтрами целесообразно устанавливать противомоскитные сетки с более мелким размером ячейки, как это сделано на КВОУ ГТУ GE 9HA.01 Казанской ТЭЦ-3 (*рис. 2.43*).

В соответствии с документом «Общие технические требования к системам фильтрации для энергетических газотурбинных установок» РАО «ЕЭС России», а также техническим заданием на проектирование, изготовление и поставку ВЗТ для энергетической ГТУ одним из требований заказчика является исключение образования наледей и сосулек, попадания каких-либо предметов в проточную часть ГТУ. Из-за невыполнения этих требований на ряде российских ТЭЦ с ПГУ в зимний период происходило обледенение и выход из строя воздушных фильтров, приведшее к неплановому останову ГТУ (*рис. 2.44*) [12].

При определенных параметрах температуры, влажности воздуха и скорости ветра могут возникнуть условия, приводящие к обмерзанию за-

щитных сеток КВОУ от птиц и мусора (*рис. 2.45*) и, как следствие, возникновению неравномерности потока воздуха на входе в ГТУ.

Исследования, выполненные в работе [13], показывают значительное влияние неравномерности потока на работу осевых компрессоров. Уменьшение расхода воздуха через осевой компрессор приводит к тому, что практически стационарное осесимметричное течение потока в его проточной части становится неустойчивым. Плавное (безударное) обтекание лопаточного аппарата компрессора нарушается. Углы атаки на рабочие лопатки становятся положительными, в результате чего на них происходит срыв потока, приводящий к возникновению вихревых течений, падению степени повышения давления и *КПД* компрессора.

При дальнейшем уменьшении расхода воздуха и росте углов атаки может возникнуть вращающийся срыв и помпаж, приводящий к разрушению лопаточного аппарата компрессора [14]. Одним из способов предотвращения помпажа является поворот лопаток входного направляющего аппарата (ВНА) в сторону увеличения расхода воздуха для обеспечения оптимального (безударного) обтекания лопаток осевого компрессора. Однако при 100 %-ном открытии ВНА и продолжающемся снижении расхода воздуха, обусловленном обмерзанием (дросселированием) воздухо-

Рис. 2.43. КВОУ ГТУ Казанской ТЭЦ-3

Рис. 2.44. Лед и снег на ФГО КВОУ ГТУ Тюменской ТЭЦ-1

Рис. 2.45. Обмерзание защитных сеток от птиц и мусора КВОУ ГТУ

заборного устройства, предотвращение нестационарных процессов и обеспечение надежной, эффективной работы компрессора и ГТУ становится проблематичным. Срабатывают антипомпажные устройства, и происходит останов турбомашины.

Вероятность появления наземного обледенения, в том числе измороси, обусловлена не только влажностью воздуха в нижнем приземном слое атмосферы, но и такими климатическими факторами, как наличие переохлажденного дождя, мороси, тумана, а также перемещения низких слоистых облаков при отрицательной температуре воздуха у поверхности земли, наличия сублимации водяного пара при дымке и тумане, умеренного и сильного ветра в пограничном слое атмосферы и множества других факторов в различном сочетании. Кроме того, существенное влияние на обледенение оказывает расположение объектов вблизи рек, водоемов и других источников повышенной влажности.

Эмпирическим путем установлено, что все виды наземного обледенения вне зависимости от дополнительных климатических факторов, перечисленных выше, происходят при температурах воздуха нижнего слоя атмосферы в пределах от –25 до +5 °С.

Однако помимо естественных, климатических условий возникновения обледенения, существуют искусственные, рукотворные причины, обусловленные ошибками проектирования. Одна из таких часто встречающихся ошибок проектирования – неучет превалирующего направления «розы ветров» и, как следствие, неправильное размещение оборудования на объекте.

Факторы, влияющие на обмерзание защитных сеток от птиц и мусора КВОУ ГТУ

Характерным примером ошибок проектирования, приводящих к обледенению элементов КВОУ и снижению эффективности работы ГТУ Siemens SGT5-4000F, является энергоблок ПГУ-400 ГРЭС, расположенной в Пермском крае на берегу реки Яйва (*рис. 2.46*). Рассмотрим климатические условия эксплуатации оборудования на этой электростанции. В районе ГРЭС отмечается холодная многоснежная зима и короткое лето с обильными осадками, коротким периодом жарких дней [15].

На основании многолетних наблюдений установлено:

Абсолютная минимальная температура, °С	–48,3
Абсолютная максимальная температура, °С	+36,7
Среднегодовая температура, °С	+1,1
Средняя месячная относительная влажность воздуха, %	
– наиболее холодного месяца	85

– наиболее жаркого месяца	69
Продолжительность периода с температурой ≤ 0 °С, дней	145
Продолжительность отопительного периода, суток	236

Рис. 2.46. КВОУ ГТУ SGT5-4000F Яйвинской ГРЭС [14]

В атмосферной циркуляции доминирует меридиональное перемещение воздушных масс с наибольшей повторяемостью южных ветров. Скорости ветра умеренные, со среднегодовым значением 3,6 м/с.

В соответствии с этими данными и ГОСТ 16350-80 климат района определен как умеренно-холодный.

Представленные данные показывают, в каких тяжелых климатических условиях работает ПГУ-400 ГРЭС. Низкие температуры, долгий отопительный сезон существенно влияют на эффективность работы ГТУ и предъявляют высокие требования к надежности ее оборудования.

Расположение ГРЭС на берегу р. Яйва обуславливает высокую влажность при низкой температуре окружающего воздуха, что может оказывать заметное влияние на эксплуатацию ГТУ. В результате изменения теплофизических свойств рабочего тела меняется степень повышения давления в компрессоре, теплоперепады в газовой турбине и их *КПД*.

Для определения превалирующего направления ветра используют «розу ветров», построенную по результатам многолетних наблюдений конкретной местности. По данным проектной организации, в холодный и теплый периоды превалирующим в районе ГРЭС является южное направление ветра.

С помощью системы «Глонасс» была выполнена рекогносцировка КВОУ на территории ГРЭС и сопоставление полученных данных с «розой ветров» (*рис. 2.47*).

Рис. 2.47. КВОУ ГТУ Яйвинской ГРЭС с «розой ветров» [14]

Из представленных данных видно, что набольшему воздействию пыли, согласно «розе ветров», подвергаются фильтры, установленные на правой стороне КВОУ.

Кроме того, с этой же стороны КВОУ располагается атмосферная труба расширительных дренажей паровой турбины (обозначена цифрой 1). Срез этой трубы незначительно возвышается над верхним модулем правого всаса КВОУ. Следовательно, при превалирующем южном направлении ветра влажный пар из расширительных дренажей паровой турбины (выпар) будет поступать на вход правой и центральной части КВОУ.

В летние месяцы повышенная влажность и температура будут отрицательно сказываться на эффективности работы фильтров-коагуляторов первой ступени КВОУ. В зимнее время это чревато обмерзанием и дросселированием защитных сеток, предотвращающих попадание посторонних предметов и птиц в КВОУ. К этому следует добавить, что башенная градирня мокрого типа также находится с южной стороны КВОУ, а его центральная часть обращена непосредственно к реке. На *рис. 2.48* отчетливо видно, как облако влажного пара поступает на вход КВОУ с правой стороны.

При низкой температуре окружающей среды влажный пар из расширительных дренажей паровой турбины конденсируется и, оседая на защитных сетках от птиц и мусора, превращается в иней и лед (*рис. 2.49*). Изменение агрегатного состояния водяного пара происходит настолько быстро, что установленный за защитными сетками теплообменный аппарат (ТА) не оказывает существенного влияния на процесс их обмерзания.

Теплообменный аппарат предназначен для подогрева атмосферного воздуха, поступающего в КВОУ, с целью предотвращения обмерзания воздушных фильтров, установленных за ним (вниз по потоку к ГТУ). Поэтому конвективный теплообмен между холодными и теплыми массами воздуха вверх по потоку (у защитных сеток) практически не осуществляется.

При небольшой скорости ветра южного направления влажный пар зависает над КВОУ, обволакивая его густой пеленой тумана. В этом

Рис. 2.48. Влажный пар из расширительных дренажей паровой турбины [14]

Рис. 2.49. Обмерзание защитных сеток от птиц и мусора КВОУ ГТУ Яйвинской ГРЭС [15]

случае все три воздухозабора КВОУ одновременно подвержены воздействию повышенной влажности (то же самое происходит в зимний период во время испарения воды в реке при любом направлении ветра). При усилении южного ветра влажный пар не обволакивает всл КВОУ, а перемещается вдоль него справа налево. Поэтому наибольшему воздействию влажности подвержены верхние модули, особенно правой и центральной части КВОУ. Таким образом, в зависимости от скорости превалирующего южного направления ветра наблюдается две картины образования локальной области повышенной влажности в районе КВОУ.

Рис.2.50. Изменение плотности инея по высоте сетки от птиц и мусора [15]

Температура пара по мере его продвижения вдоль КВОУ, а также сверху вниз уменьшается, тем самым снижается интенсивность обмерзания защитных сеток по высоте. Поэтому плотность инея, образующегося на сетках, неравномерна по поверхности и уменьшается справа налево и сверху вниз (*рис. 2.50*).

Обмерзание защитных сеток сопровождается ростом перепада давления на них, дросселированием входного сечения воздухозабора, приводящим к снижению расхода циклового воздуха ГТУ. При наиболее интенсивном обмерзании защитных сеток правого и центального входа КВОУ расход воздуха через его левую часть может увеличиться, что приведет к росту перепада давления и повышенной пылевой нагрузке на фильтрах, сокращающей срок их службы.

Следует отметить, что конструкцией КВОУ не предусмотрена установка датчиков, фиксирующих перепад давления на защитных сетках. Мониторинг изменения давления в трехступенчатой системе фильтрации циклово воздуха ГТУ осуществляется штатными контрольно-измерительными приборам на одном из фильтров каждой ступени очистки воздуха и всем КВОУ. Поэтому перепад давления на защитной сетке от птиц и мусора определялся по перепаду давления на первой ступени фильтрации КВОУ. В процессе эксплуатации в зимний период

отмечались случаи, когда перепад давления на фильтрах-коагуляторах (первая степень фильтрации) составлял 80 % предельно-допустимой величины возрастания давления в КВОУ, что приводило к снижению выработки электроэнергии ГТУ на 1,2 % . Обращает на себя внимание тот факт, что такой перепад давления на фильтрах первой ступени и КВОУ наблюдался не в летние месяцы, когда земля не покрыта снегом и в воздухе достаточно большое количество пыли, а в зимний период эксплуатации ГТУ. Повышенный перепад давления в КВОУ характеризовал изменение давления не только на фильтрах, но и на защитных сетках при их обмерзании.

В процессе эксплуатации очистка защитных сеток КВОУ от обмерзания осуществлялась механически (сбиванием наледи) силами оперативного персонала ГРЭС. Один машинист энергоблока очищал защитную сетку КВОУ в течение получаса. За рабочую смену таких очисток могло быть несколько, что приводило к незапланированным трудозатратам по обслуживанию КВОУ.

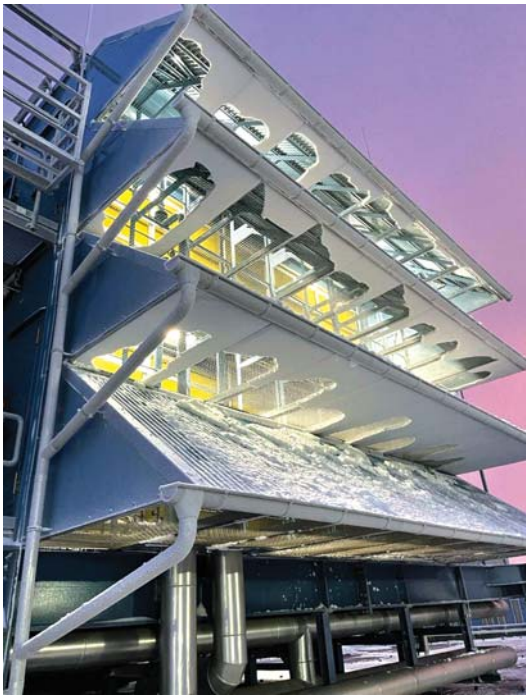


Рис. 2.51. Очистка защитных сеток от птиц на КВОУ ГТУ НКХК

Аналогичный метод очистки защитных сеток от птиц и мусора от обмерзания на КВОУ ГТУ Siemens SGT5-2000E применяется и на ПГУ-ТЭС Нижнекамского химического комбината – НКХК (*рис. 2.51*), и на КВОУ ГТЭ-160 ООО «Хуадянь-Тенинская ТЭЦ» (*рис. 2.52*).

Рис. 2.52. Очистка защитных сеток от птиц на КВОУ ГТЭ-160 ООО «Хуадянь-Тенинская ТЭЦ»

Эффективность механической очистки защитных сеток от льда и инея на Яйвинской ГРЭС определялась путем мониторинга трендов параметров фильтров КВОУ и ГТУ. Ежеминутное, пошаговое

фиксирование параметров этих величин дает дифференциальную картину процессов, происходящих с фильтрами и ГТУ (ПГУ).

На *рис. 2.53* представлены тренды изменения давления на фильтрах-коагуляторах (P_1), в КВОУ ($P_{КВОУ}$), а также относительной влажности (RH) и активной мощности энергоблока (N) на Яйвинской ГРЭС.

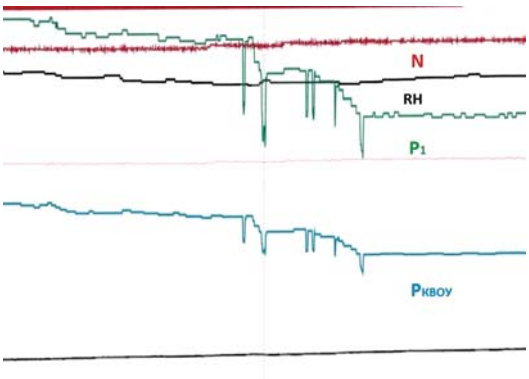


Рис. 2.53. Тренды изменения давления на фильтрах-коагуляторах и КВОУ ГТУ [15]

Очистка защитных сеток КВОУ от инея происходила на постоянной нагрузке энергоблока по диспетчерскому графику генерации при 85 % положении ВНА, температуре окружающей среды –18 °С и относительной влажности воздуха 85 %. По этим трендам можно судить, как менялся перепад давления на фильтрах и КВОУ по мере очистки защитных сеток от инея (льда) и какова эффективность этой процедуры.

Наибольшая величина снижения перепада давлений была зафиксирована на фильтрах-коагуляторах. Перепад давления в КВОУ имел тренд, аналогичный флуктуациям давления на фильтрах-коагуляторах. Всего в течение нескольких минут перепад давления на фильтрах-коагуляторах уменьшился на 225 Па, а мощность энергоблока увеличилась на 3,35 МВт. Эти цифры наглядно показывают, какое негативное воздействие на эффективность и надежность работы ГТУ оказывает неучет климатических условий, природных и рукотворных источников повышенной влажности, а также превалирующего направления «розы ветров» при размещении оборудования на этапе проектирования блоков ПГУ.

Резюме

1. Проектной организацией при разработке проекта энергоблока не была учтена «роза ветров», в результате чего выпары из атмосферной трубы с расширительных дренажей паровой турбины поступают прямо в правый всас КВОУ. Кроме того, с этой же (южной) стороны расположена градирня мокрого типа, а центральная часть КВОУ расположена прямо напротив реки Яйва.

2. КВОУ изготовлено без учета сложных климатических условий, в которых эксплуатируется ГРЭС. Не учтены повышенная влажность окружающей среды, обусловленная парением реки в зимний период.

Теплообменный аппарат КВОУ не обеспечивает обогрева защитных сеток от птиц и мусора.

Факторы, изложенные в пунктах 1 и 2, оказывают существенное влияние на обмерзание защитных сеток КВОУ, рост аэродинамических потерь на входе в ГТУ и недовыработку электроэнергии ПГУ.

Другим примером обмерзания защитных сеток от птиц и мусора КВОУ ГТУ является ТЭЦ, расположенная на юге Москвы. Здесь нет экстремальных минусовых температур и парения от рядом протекающей реки, как на ГРЭС в Пермском крае. Расстояние между этими двумя электростанциями по прямой составляет 1233 км. Но, как и в первом случае, причиной обмерзания защитных сеток является неоптимальное размещение рукотворного источника влажного пара (вентиляторной градирни) по отношению к КВОУ ГТУ.

В зимний период при направлении ветра с севера на юг влажные пары воздуха от вентиляторной градирни поступают на всас КВОУ, приводя к обмерзанию защитной сетки (*рис. 2.54*). В результате этого проходное сечение воздухозабора дросселируется, снижается расход воздуха и растет перепад давления на КВОУ, что ведет к снижению эффективности работы ГТУ GE-26B.2.2.

Надо отметить, что негативное влияние влажного пара вентиляторных градирен, поступающего

Рис. 2.54. Обмерзание защитной сетки от птиц КВОУ ГТУ

Рис. 2.55. Пар от градирен на всасе КВОУ ГТУ SGT5-4000F

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 повышенной температуры на всас КВОУ вызывало снижение расчетной нагрузки ГТУ SGT5-4000F на 5–8 МВт (*рис. 2.55*). В результате ТЭЦ была вынуждена подавать диспетчерские заявки на снижение мощности энергоблока ПГУ по причине невозможности несения номинальной нагрузки.

Другим источником влажного пара на всасе КВОУ являются барботеры, расположенные непосредственно у воздухозабора ГТУ. На *рис. 2.56* зафиксировано поступление выпаров барботера на всас КВОУ ГТУ Ansaldo AE64.3A.

Рис. 2.56. Выпары барботера на всасе КВОУ ГТУ Ansaldo AE64.3A

Помимо обмерзания сеток, повышение влажности воздуха на всасе КВОУ в результате уноса капельный влаги из градирен, барботеров, дренажей паровых турбин приводит к дополнительной водной нагрузке на воздушные фильтры очистки циклового воздуха ГТУ. В результате перепад давления на них возрастает, а эффективность фильтр-элементов снижается, что приводит к увеличению расхода топливного газа для поддержания электрической нагрузки, установленной системным оператором.

Технические решения по предотвращению обмерзания защитных сеток от птиц и мусора КВОУ ГТУ

Для предотвращения обмерзания защитных сеток на КВОУ ГРЭС на реке Яйва было принято решение установить систему электрообогрева клетей металлической защитной сетки от птиц и мусора. Она должна была автоматически включать нагревательные секции при снижении температуры окружающей среды ниже заданной во избежание замерзания защитных сеток КВОУ. В качестве исполнительных элементов системы электрообогрева используются секции, выполненные из саморегулирующегося греющего электрического кабеля, размещенного на металлических клетях защитной сетки внутри погодных козырьков КВОУ (*рис. 2.57*).

Применение в системе обогрева саморегулирующихся нагревательных секций имеет следующие характерные особенности

– с изменением температуры обогреваемого объекта или окружающей среды греющий кабель пропорционально меняет тепловыделение (уменьшает при повышении температуры и наоборот), что позволяет более рационально расходовать энергопотребление на систему электрообогрева;

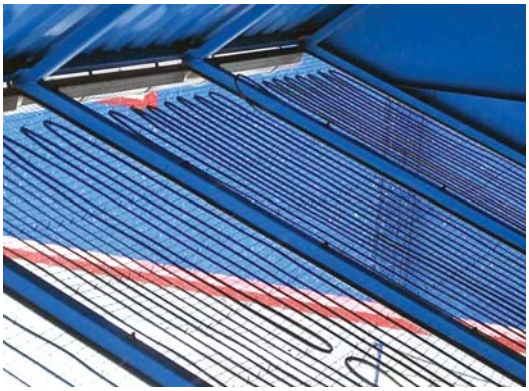


Рис. 2.57. Саморегулирующийся греющий электрический кабель в КВОУ ГТУ [15]

– саморегулирование также повышает безопасность и надежность системы: секции не перегреваются и не перегорают даже при пересечении соседних ниток друг с другом.

Источником питания потребителей системы электрообогрева является однофазный электрический ток ~220 В, 50 Гц. Общая установочная мощность оборудования составляет 47,16 кВт.

В системе электрообогрева предусмотрены меры основной и дополнительной защиты от поражения электрическим током при прямом и косвенном прикосновении и защиты от токов короткого замыкания. Греющий электрический кабель имеет все разрешения и сертификаты в соответствии с законодательством Российской Федерации.

Для автоматического регулирования температуры обогреваемых объектов применен терморегулятор с функцией установки требуемой температуры и отображения ее текущего значения. Терморегулятор предназначен для преобразования и обработки данных, поступающих от датчиков сопротивления, а также для управления включением и отключением нагревательных секций. Компоненты управления системой электрообогрева размещены в шкафу управления.

В качестве чувствительных элементов системы электрообогрева используется термометр сопротивления. Поскольку при превалирующем южном направлении ветра наибольшему обмерзанию подвержены верхние модули КВОУ, термометр сопротивления устанавливается непосредственно на самом верхнем ярусе. Он должен сигнализировать об изменении температуры обогреваемой поверхности. С учетом того, что вероятность возникновения обледенения, вне зависимости от дополнительных климатических факторов, определяется напрямую диапазоном температур –25...+5 °С, система электрообогрева не функционирует по-

стоянно. Следовательно, с точки зрения экономии электроэнергии, она энергоэффективна.

Применительно к условиям ГРЭС установки срабатывания системы электрообогрева были изменены с +5 °С на –5 °С, поскольку появление инея на защитных сетках от птиц и мусора КВОУ отмечалось при более низких температурах. Таким образом, саморегулирующийся нагревательный кабель включается в работу начиная с –5 °С.

Преимуществами установки системы электрообогрева защитных сеток КВОУ являются:

– современное решение проблем наледи без механического повреждения защитных сеток при их очистке и без привлечения оперативного персонала ГРЭС;

– автоматическая работа системы без участия персонала;

– энергоэффективность, достигаемая с помощью саморегулирующегося нагревательного кабеля и системы управления;

– система обогрева с использованием саморегулирующегося нагревательного кабеля достаточно проста при проведении монтажных работ.

Предполагалось, что такое техническое решение позволит обеспечить защиту сеток КВОУ от обледенения вне зависимости от сложности погодных условий. Однако, как показал опыт эксплуатации саморегулирующегося греющего электрического кабеля в течение шести лет, эта антиобледенительная система не всегда полностью защищала сетки КВОУ ГТУ от обмерзания. Надежность этой системы характеризуется тем, что в течение шести лет эксплуатации имел место один отказ саморегулирующего греющего электрического кабеля, причем случилось это во время сильного обледенения элементов КВОУ.

Сравнение работы ГТУ при исправном, хотя и не обеспечивающем полного предотвращения обмерзания защитных сеток от птиц и мусора КВОУ, и неисправном устройстве, говорит в пользу принятого технического решения, хотя и требующего доработки.

Аналогичная система предотвращения обмерзания защитных сеток от птиц и мусора была применена немецкой компанией Freudenberg Filtration Technologies для КВОУ ГТУ Solar Taurus 70 на предприятии компании Meggle в Вассербурге (Wasserburg, Германия) в 55 км от Мюнхена (*рис. 2.58*) [16]. Город находится на полуострове, образованном рекой Инн. Климат умеренно теплый, минимальная температура наружного воздуха в январе –4,6 °С, влажность высока из-за полуостровного расположения города. Такие системы предотвращения обмерзания защитных сеток от птиц и мусора успешно работают на нескольких КВОУ в Северной Германии.

Рис. 2.58. АОС КВОУ ГТУ SolarTaurus70 с саморегулирующимся греющим электрическим кабелем [15]

На ТЭЦ, расположенной на юге Москвы, для устранения обмерзания защитных сеток от птиц и мусора КВОУ GE-26B.2.2 было применено оригинальное техническое решение. Из-за большой высоты КВОУ (четыре яруса) и отсутствия площадок обслуживания, с которых можно было бы устранять наледь, как это первоначально делалось на ГРЭС в Пермском крае, к защитным сеткам от птиц и мусора были прикреплены веревки, позволяющие с крыши помещения энергоблока очищать сетки стряхиванием (*рис. 2.59*). Такой метод очистки защитных сеток от наледи основан на известном принципе вибрации. Для этого могут использоваться пневматические, электрические вибраторы, а также электро- и пневмомолотки, установленные на каркас сеток.

Рис. 2.59. Очистка защитных сеток от птиц и мусора КВОУ стряхиванием

Рис. 2.60. Электрический молоток компании Nippon Magnetics INC
(фото из буклета компании Nippon Magnetics INC)

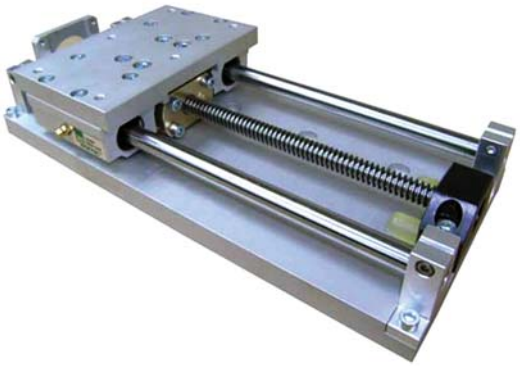


Рис. 2.61. Модуль линейного перемещения
(фото из буклета Завода мехатронных изделий)

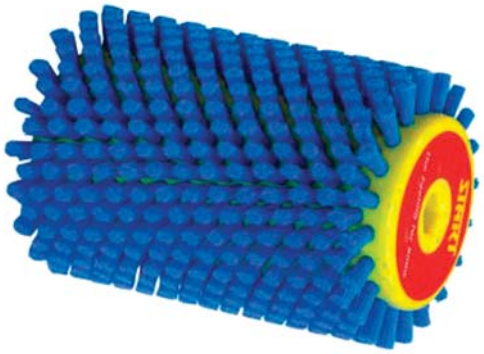


Рис. 2.62. Роторная щетка

Каждый из этих методов очистки имеет право на существование. Однако применение того или иного устройства должно соответствовать конкретным климатическим условиям эксплуатации ГТУ. Так, например, работа пневматическими вибраторами (молотками) в условиях низких температур и высокой влажности может привести к образованию конденсата в импульсных трубках этих устройств и выходу их из строя.

Исключить эту проблему возможно с помощью электрических вибраторов и молотков. Для этого предлагается использовать электрический молоток (Explosion-proof Electro Hammer (Knocker) Maghammer SIC-2EX) компании Nippon Magnetics INC (*рис. 2.60*). Но, как и в случае пневматических устройств, механическое воздействие электрических молотков на металлические конструкции защитной сетки может привести к повреждению их металлических клетей и крепежа.

В качестве примера положительного использования вибромолотков в газотурбинных технологиях надо отметить их применение в системе очистки проточной части газотурбинного двигателях ГТД-1250 (мощность 1250 л. с.) отечественных танков Т-80У. Для предупреждения отложений спекшейся пыли на лопатках турбины высокого давления, что приводило к снижению мощности двигателя, была разработана

и применена система пневматической виброочистки. В автоматическом режиме по специально разработанной циклограмме осуществлялось механическое воздействие специальных молотков на корпус ГТД [17].

Другим техническим решением, предлагаемым для очистки защитных сеток от обледенения, является модуль линейного перемещения (*рис. 2.61*). На металлический каркас сетки КВОУ устанавливается электропривод с кареткой, на которой фиксируются роторные щетки (*рис. 2.62*). В отличие от американских электрических молотков, модули линейного перемещения производятся подмосковной компанией «Завод мехатронных изделий (ЗМИ)» применительно для российских условий.

Конструктивно модули производства ЗМИ состоят из основания (несущего силового элемента) с закрепленными на нем рельсовыми или цилиндрическими направляющими качения. На фланцевых опорах установлена трансмиссия, крутящий момент к которой передаётся от двигателя через компенсирующую муфту. В качестве трансмиссии могут выступать шарико-винтовые передачи, трапецеидальный винт или рейка. За счёт движения трансмиссии происходит перемещение каретки модуля, которая в свою очередь служит базовой платформой для крепления на ней всевозможных механизмов и устройств, включая роторные щетки. С нашей точки зрения, такое техническое решение может быть рассмотрено и для очистки противомоскитных сеток. В зимний период роторные щетки сами могут быть подвержены заносу снегом и обмерзанию в условиях повышенной влажности окружающей среды.

При анализе опыта эксплуатации КВОУ ГРЭС в Пермском крае было установлено, что плотность инея, образующегося на защитных сетках от птиц и мусора, неравномерна по поверхности и уменьшается сверху вниз (*см. рис. 2.50*). Таким образом, чем ближе защитная сетка расположена к теплообменному аппарату КВОУ, тем меньше она подвержена обледенению. Следовательно, для предотвращения обмерзания защитных сеток от птиц необходимо увеличить конвективный теплообмен между источником тепла и объектом нагрева путем уменьшения максимального зазора X между теплообменным аппаратом (противообледенительной системой) КВОУ и сеткой, как это показано на *рис. 2.63б*. При сравнении *рис. 2.63а* и *2.63б* становится очевидной техническая целесообразность такого решения.

Из-за одинакового по высоте зазора между теплообменным аппаратом и сеткой обогрев всаса КВОУ ГТУ, снижающий вероятность обмерзания его элементов, будет более интенсивным и равномерным по высоте.

Такое техническое решение было реализовано на КВОУ ГТУ ТЭЦ на юге Москвы. В результате перемещения защитной сетки ближе к теп-

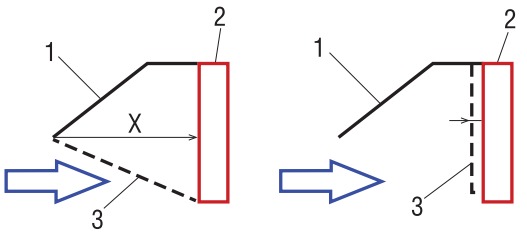


Рис. 2.63. Техническое решение по перемещению защитной сетки от птиц и мусора к теплообменному аппарату КВОУ ГТУ:
а) существующая;
б) предлагаемая система защиты;
1 – погодный козырек на всасе КВОУ;
2 – теплообменный аппарат (антиобледенительная система);
3 – защитная сетка от птиц;
X – максимальное расстояние сетки от теплообменного аппарата

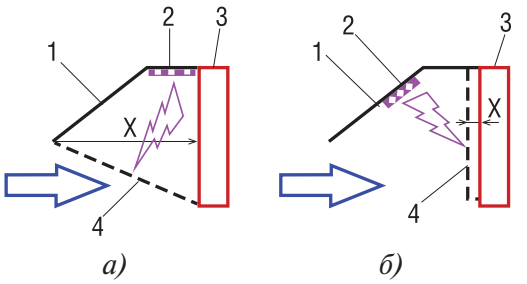


Рис. 2.64. Техническое решение по предупреждению обмерзания наклонной (а) и вертикальной (б) защитной сетки от птиц и мусора КВОУ ГТУ:
1 – погодный козырек на всасе КВОУ;
2 – инфракрасный обогреватель;
3 – теплообменный аппарат;
4 – защитная сетка от птиц;
X – максимальное расстояние сетки от теплообменного аппарата

лообменному аппарату КВОУ, максимальное расстояние X было сокращено в 6 раз.

Если перемещение защитной сетки от птиц и мусора ближе к теплообменному аппарату КВОУ невозможно или технически нецелесообразно, то для предотвращения обмерзания возможен обогрев защитных сеток с помощью ИК-обогревателей, как показано на *рис. 2.64.*

При наклонном размещении защитной сетки ИК-обогреватель целесообразно крепить внутри погодного козырька КВОУ, как показано на *рис. 2.64а*. Для защитных сеток, установленных вертикально (параллельно) к теплообменному аппарату, крепление ИК-обогреватели крепятся внутри погодных козырьков под углом к защитной сетке и противообледенительной системе (*рис. 2.64б*). Такое размещение ИК-обогревателей (ближе к сеткам) позволяет при той же мощности ламп более интенсивно воздействовать не только на защитные сетки, но и на теплообменный аппарат КВОУ.

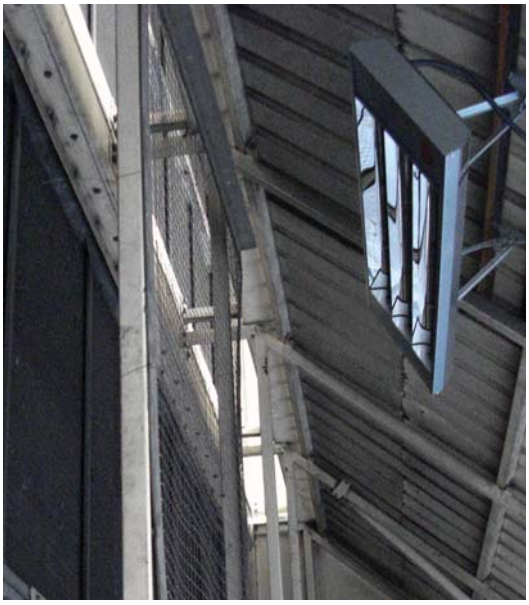
На *рис. 2.65* показана реализация схем (*см. рис. 2.63б* и *2.64б*) перемещения защитной сетки к ТА и установки ИК-обогревателя мощностью 3 кВт под погодным козырьком КВОУ ГТУ, а также термограмма нагрева его ламп. Температура ламп ИК-обогревателя на максимальном режиме достигает 300 °С всего за три минуты включения. Наибольший эффект от применения таких ИК-обогревателей достигается при установке их на расстоянии 600–1000 мм от объекта нагрева.

Резюме:

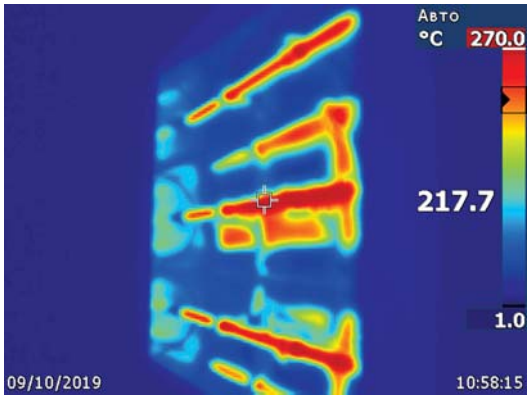
– расстояние между Вассербургом (Германия) в Западной Европе и ГРЭС в Пермском крае на востоке Европейской части России, в Предуралье составляет 3200 км по прямой. Несмотря на это значительное расстояние и различные климатические условия, на двух энергетических объектах применено одинаковое техническое решение по предотвращению обмерзания защитных сеток от птиц и мусора КВОУ ГТУ с помощью саморегулирующегося греющего электрического кабеля;

– в процессе эксплуатации данного устройства для обогрева защитных сеток в Вассербурге (Wasserburg – Замок на воде, нем.) в условиях повышенной влажности в течение восьми лет отмечается его высокая эффективность и надежность предупреждения обмерзания;

– несмотря на недочеты в работе системы обогрева защитных сеток с помощью саморегулирующегося греющего электрического кабеля КВОУ ГТУ на ГРЭС в Пермском крае, такое техническое решение можно рекомендовать для борьбы с наледью в сложных климатических условиях низких температур и высокой влажности атмосферного воздуха;



а)



б)

Рис. 2.65. ИК-обогреватель в КВОУ ГТУ:
а) ИК-обогреватель;
б) термограмма ламп

– интересным и перспективным техническим решением по предупреждению обмерзания защитных сеток от птиц и мусора является применение инфракрасных обогревателей;

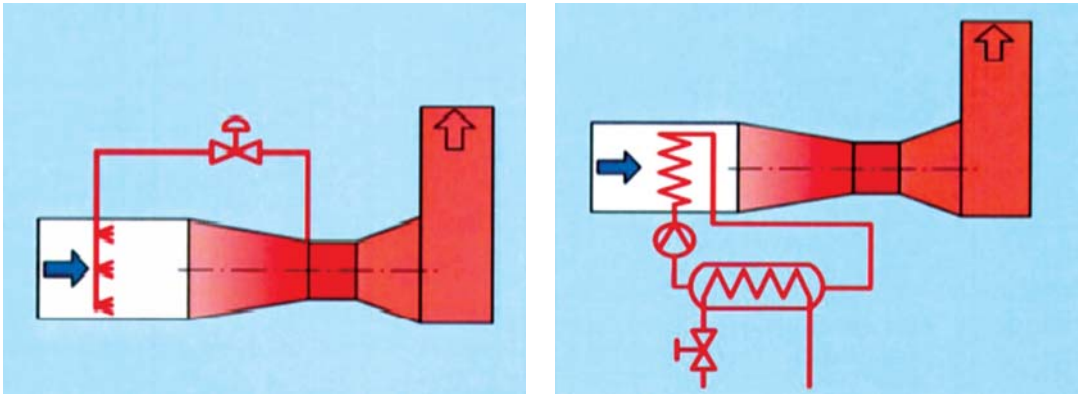
– применение данных технических решений позволяет минимизировать последствия ошибок, допущенных в процессе проектирования блоков ПГУ.

2.4. Антиобледенительная система КВОУ ГТУ

Система антиобледенения предназначена для предотвращения образования льда на воздушных фильтрах КВОУ, во входном конфузоре и на лопатках входного направляющего аппарата компрессора, а также для подогрева циклового воздуха на входе в ГТУ при низких температурах наружного воздуха. Используются различные технические решения подогрева воздуха на всасе и фильтров КВОУ:

– отбор и подача горячего воздуха из последних ступеней компрессора ГТУ;
– отбор и подача горячих выхлопных газов на всас КВОУ;
– установка теплообменных аппаратов перед фильтрами КВОУ;
– инфракрасный обогрев фильтров КВОУ;
– электрический нагрев атмосферного воздуха.

Наибольшее применение в электроэнергетике получили два технических решения: отбор горячего воздуха из последних ступеней компрессора ГТУ с подачей его на всас КВОУ и установка теплообменных аппаратов перед фильтрами КВОУ ГТУ (*рис. 2.66*).



а) *б)*

Рис. 2.66. Принципиальные схемы АОС:
а) подача горячего воздуха из последних ступеней компрессора ГТУ;
б) обогрев атмосферного воздуха в теплообменном аппарате

В АОС, предусматривающей отбор горячего воздуха из-за одной из ступеней компрессора ГТУ, подача теплоносителя осуществляется по трубам открыванием запорного клапана (*рис. 2.66а*). Например, на ГТЭ-160 предусмотрен отбор горячего воздуха из последней, 16-й компрессорной ступени с температурой 310 °С и давлением 1,2 МПа, который подается в пространство перед воздушными фильтрами. Распыл горячего воздуха на

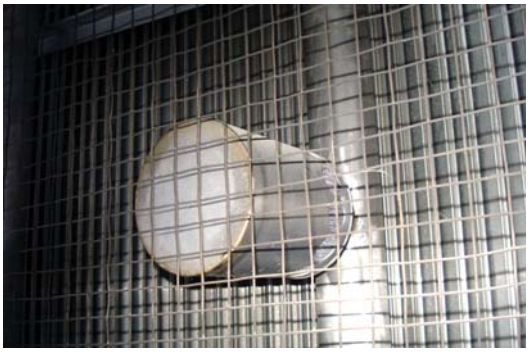
всасе КВОУ осуществляется через боковые поверхности форсунок на 360° (*рис. 2.67а, б*). Для равномерного нагрева всех воздушных фильтров КВОУ форсунки распыла устанавливаются в шахматном порядке (*рис. 2.67в*).

Однако, как показал опыт эксплуатации таких АОС, распыл горячего воздуха через форсунки не обеспечивает равномерного обогрева всей фронтальной площади фильтров КВОУ. На *рис. 2.68* отчетливо видны светлые пятна нагретой поверхности части сервисной дорожки и воздушных фильтров КВОУ компании Camfil Farr для ГТЭ-160 в Москве.

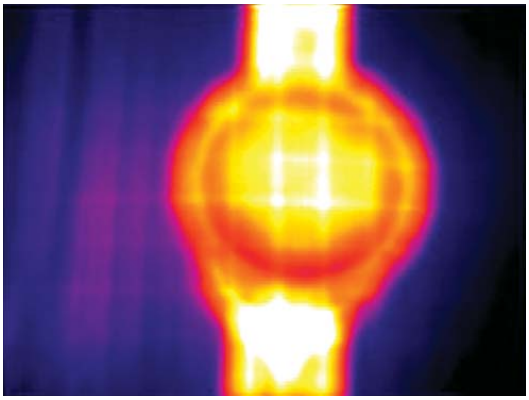
Другое техническое решение по распылу горячего воздуха на всасе КВОУ компании BIS Gerber (Германия) представлено на *рис. 2.69*. Горячий воздух от компрессора ГТУ через шумоглушитель поступает в трубу, откуда распыляется на всасе КВОУ.

Аналогичный подход к созданию АОС был использован на КВОУ Калининградской ТЭЦ-2. В *главе 1* на *рис. 1.2* показана АОС с отверстиями в стойке этого КВОУ для подачи горячего воздуха перед фильтрами. Из-за отсутствия глушителя шума в системе АОС КВОУ Калининградской ТЭЦ-2 при ее работе был слышен характерный свист, издаваемый выходящим горячим воздухом.

Еще одно техническое решение по распылу горячего воздуха перед



а)



б)

в)

Рис. 2.67. АОС распыла горячего воздуха:
а) форсунка распыла;
б) термограмма распыла горячего воздуха;
в) расположение форсунок распыла на КВОУ ГТУ на Адлерской ТЭС

а)

б)

Рис. 2.68. Результат работы АОС с распылом горячего воздуха в шахматном порядке: а) воздушные фильтры мокрые; б) воздушные фильтры занесены снегом

фильтрами КВОУ ГТУ Siemens V64.3 в Дрездене (Германия) приведено на *рис. 2.70*.

Ранее на *рис. 1.15* была показана АОС с вертикальным расположением стоек распыла горячего воздуха перед воздушными фильтрами для КВОУ ГТЭ-110 Ивановских ПГУ.

Отбор сжатого горячего воздуха от одной из последних ступеней компрессора ГТУ и подача его на всас КВОУ влечет за собой уменьшение массы рабочего тела, поступающего в турбомашину, а следовательно, снижение вырабатываемой мощности и *КПД* энергоблока. На примере ГТЭ-160 рассмотрим влияние включения антиобледенительной системы на мощность, расход газа турбомашины и *КПД* энергоблока ПГУ-450 [18]. С этой целью проанализируем соответствующие поправочные кривые для ГТЭ-160. На *рис. 2.71* и *2.72* представлены графические зависимости влияния включенной АОС на мощность и расход газов за ГТУ при различной разности температур воздуха перед компрессором и наружного. Из приведенных графиков очевидна зависимость уменьшения мощности, расхода газа за ГТУ с увеличением разности температур, а также мощности, поддерживаемой энергоблоком согласно заявке системного оператора.

Анализ влияния включения антиобледенительной системы КВОУ на работу ГТЭ-160 на номи-

нальном режиме в составе блока ПГУ-450 показал следующее:

– снижение мощности каждой ГТУ, входящей в энергоблок, может превышать 22 МВт;

– снижение расхода газов за ГТЭ-160 может превышать 13 кг/с;

– *КПД* энергоблока брутто может снижаться на 5 %, что потребует введения соответствующей поправки (*рис. 2.73*).

Такие энергетические потери ГТУ и энергоблоков ПГУ (без учета потерь на паровой турбине) накладывают серьезные ограничения на применение данного типа АОС в электроэнергетике.

Другим подходом для предотвращения обледенения воздушных фильтров КВОУ и проточной части компрессора ГТУ является применение теплообменных аппаратов (ТА), внутрь которых подается водно-гликолевый раствор. Процентное содержание гликоля в смеси порядка 60 %. АОС включается автоматически, температура подачи водно-гликолевой смеси регулируется в соответствии с температурой и влажностью атмосферного воздуха АСУ ТП ГТУ. Условиями для обледенения считается температура атмосферного воздуха ниже +5 °С и относительная влажность выше 80 %.

Теплообменный аппарат КВОУ ГТУ изготавливается из медных оребренных труб, а ребра из алюминиевого сплава, покрытого эпоксидной смолой (*рис. 2.74*).

Рис. 2.69. Распыл горячего воздуха через отверстия в трубе АОС

Рис. 2.70. АОС распыла горячего воздуха через горизонтальные стойки

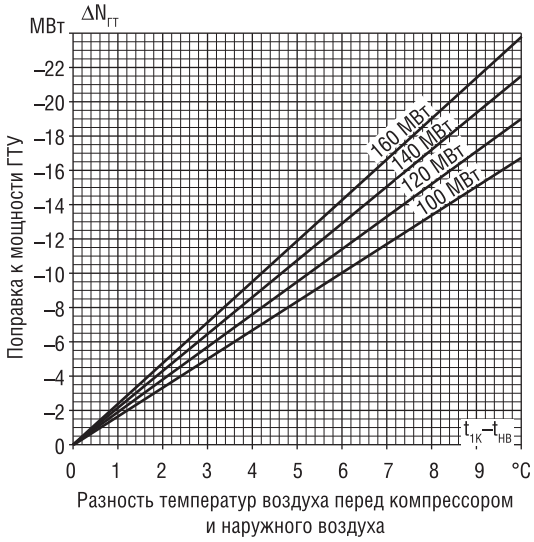


Рис. 2.71. Поправка мощности ГТЭ-160 на включение АОС [18]

ТА состоит из нескольких секций. Например, для КВОУ с трехсторонним всасом для ГТУ Siemens SGT5-4000F количество секции ТА равно 9. Согласно техническим характеристикам производителя, перепад давления на теплообменном аппарате должен быть менее 1 мбар (фактически 0,33–0,5 мбар). Подача теплоносителя в ТА осуществляется электронасосами. Максимально допустимая вертикальная температурная неравномерность подогретого воздуха не должна превышать ± 2 °С (*рис. 2.75*).

При эксплуатации необходимо постоянно следить за герметичностью (протечками) ТА и концентрацией водно-гликолевой смеси, не допуская ее снижения ниже допустимых норм. При достижении этого значения необходимо добавить антифриз до нормы, а в случае его отсутствия выключить ТА и полностью слить из него воду. Нарушение этого требования инструкции по эксплуатации может привести к повреждению ТА. Так, на ГРЭС в Пермском крае из-за отсутствия необходимого количества гликоля в зимний период эксплуатации ГТУ Siemens SGT5-4000F был разморожен теплообменный аппарат.

На *рис. 2.76* изображен обмерзший и занесенный снегом ТА, который практически полностью дросселирует поток атмосферного воздуха на всасе ВЗТ, что может привести к помпажу компрессора ГТУ.

Отложения на ребристой поверхности и трубах, образующиеся в процессе эксплуатации из-за загрязнения плодами цветения растений, деревьев, насекомыми и мусором, уменьшают конвективный теплообмен с окружающей средой (*см. рис. 2.42б*). Кроме того, возрастает перепад давления на ТА, что ведет к снижению вырабатываемой мощности ГТУ, поэтому эти загрязнения постоянно должны удаляться.

Рассмотрим влияние включения антиобледенительной системы на работу ГТУ SGT5-4000F. С этой целью проанализируем соответствующие поправочные кривые для мощности и *КПД* ГТУ, приведенные на *рис. 2.77, 2.78* [19].

Из рассмотренных зависимостей, представленных на *рис. 2.77*, очевидно, что температура воздуха, создаваемая ТА для предотвращения

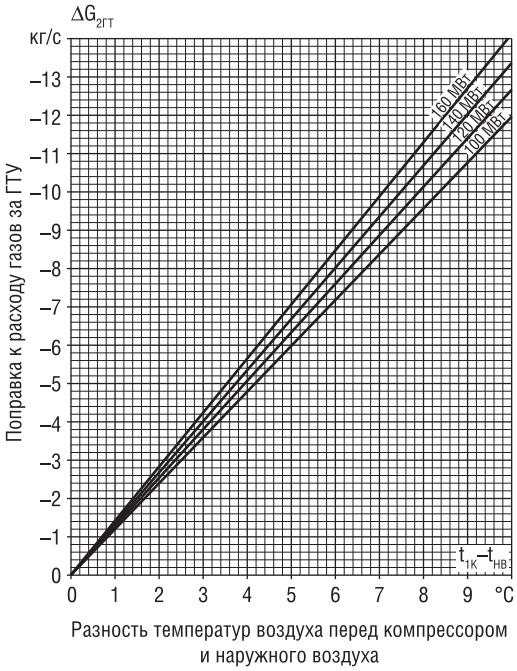


Рис. 2.72. Поправка расхода газов ГТЭ-160 на включение АОС [18]

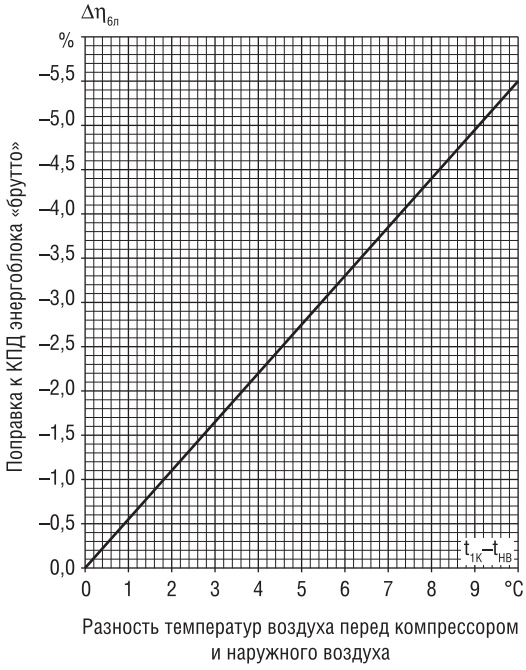


Рис. 2.73. Поправка к КПД энергоблока брутто на включение АОС [18]

обмерзания воздушных фильтров КВОУ и всаса осевого компрессора, практически не оказывает влияния на мощность и *КПД* ГТУ. Анализ поправочных кривых мощности и *КПД* ГТД (*рис. 2.78*) указывает на то, что фактический диапазон потерь полного давления, создаваемый ТА, также существенно не влияет на изменение мощности и *КПД* ГТУ.

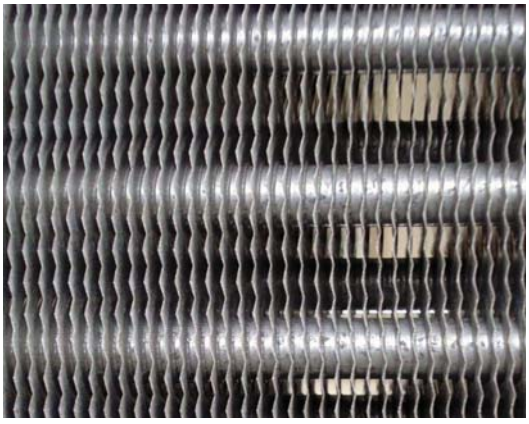


Рис. 2.74. Оребренные медные трубки и алюминиевые ребра ТА

Рис. 2.75. Теплообменный аппарат в КВОУ ГТУ

Рис. 2.76. Теплообменный аппарат КВОУ ГТУ, обледеневший и занесенный снегом

Ниже представлена таблица сравнения двух рассмотренных систем АОС КВОУ ГТУ (*табл. 2.5*).

Использование инфракрасного обогрева было показано на *рис. 2.65* в разделе защитных сеток от птиц и мусора КВОУ ГТУ. В отличие от привычных конвекторов, ИК-обогреватели нагревают не воздух в помещении, а предметы, находящиеся в нем. Немецкая компания Freudenberg Filtration Technologies применяет ИК-обогреватели для предотвращения обмерзания воздушных фильтров КВОУ ГТУ в различных регионах Германии с 2007 года. На КВОУ, изображенном на *рис. 2.58*, помимо саморегулирующегося греющего электрического кабеля для защитной сетки от птиц и мусора, для пред-

Сравнение преимуществ и недостатков двух систем АОС ***Таблица 2.5***

Система распыла горячего воздуха	Теплообменный аппарат
Преимущества	
■ В выключенном состоянии из-за небольшого перепада давления на трубах и форсунках не оказывается существенного влияния на работу и характеристики ГТУ. ■ Не требуется трудоемкая очистка от загрязнений.	■ Равномерный прогрев поверхности первой ступени очистки воздуха КВОУ ГТУ. ■ Не используется в качестве теплоносителя сжатый воздух компрессора ГТУ. ■ Не оказывается существенного влияния на мощность и *КПД* ГТУ.
Недостатки	
■ Уменьшение массы рабочего тела, поступающего в ГТУ. ■ Понижение массы выхлопных газов за ГТУ. ■ Снижение вырабатываемой мощности и *КПД* ГТУ. ■ Неравномерный прогрев поверхности первой ступени очистки воздуха КВОУ вызывает занос снегом фильтров, рост перепада давления на них и приводит к снижению выработки мощности и *КПД* ГТУ.	■ Требуется защита от загрязнения плодами цветения растений, деревьев, насекомыми и мусором. ■ Загрязнение в процессе эксплуатации ведет к росту перепада давления и снижению конвективного теплообмена, вследствие чего происходит снижение выработки мощности и *КПД* ГТУ. ■ Трудоемкая очистка от загрязнений.

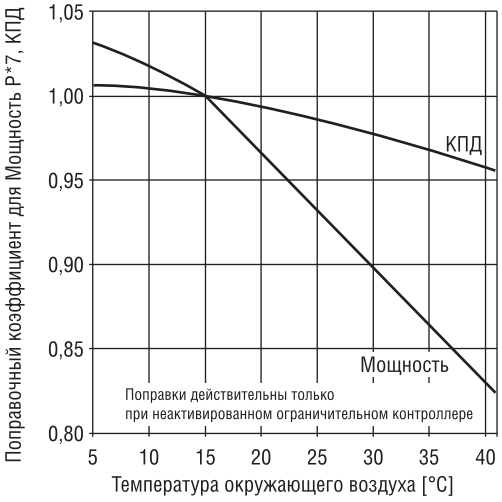


Рис. 2.77. Поправочные коэффициенты для мощности и КПД SGT5-4000F от температуры воздуха [19]

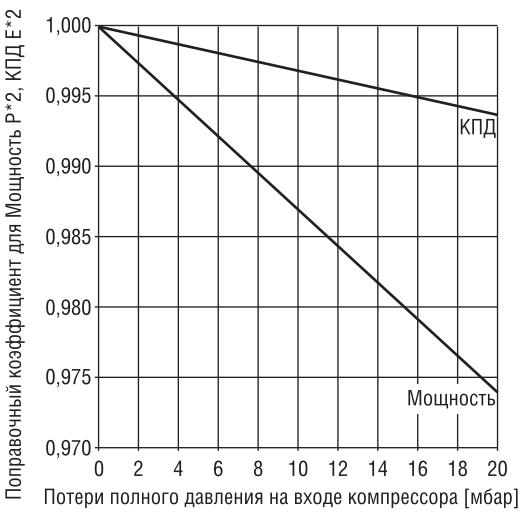
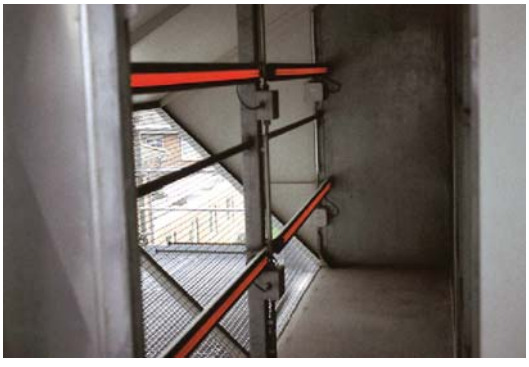


Рис. 2.78. Поправочные коэффициенты для мощности и КПД SGT5-4000F от потерь полного давления на входе в компрессор [19]

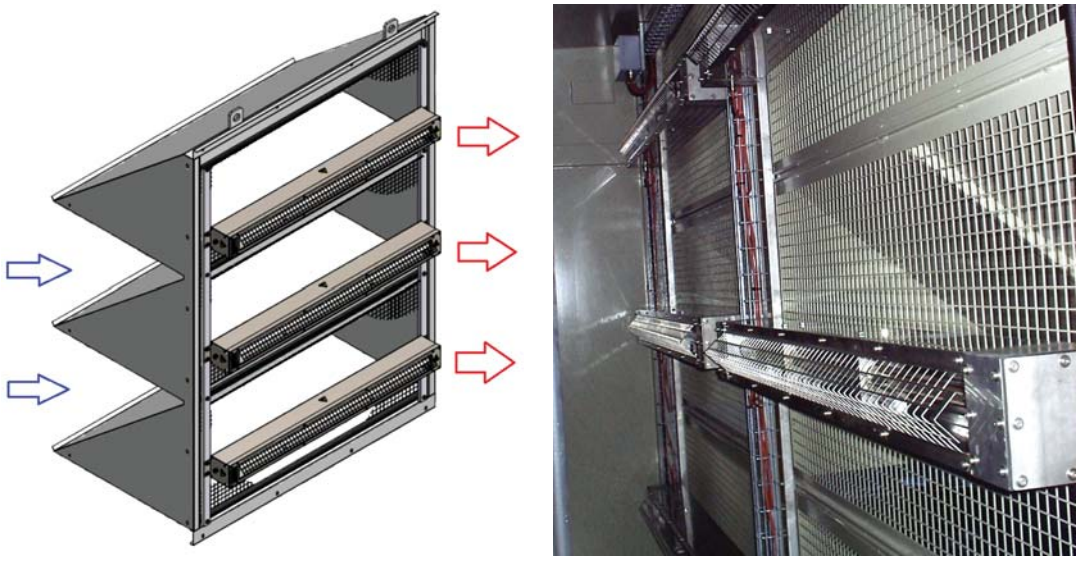
отвращения заноса снегом фильтров первой ступени используются ИК-обогреватели. Двухступенчатая система предотвращения обмерзания защитных сеток, а также фильтров первой ступени очистки воздуха ГТУ применяется в КВОУ, не снабженных традиционной штатной антиобледенительной системой. Опыт применения этих устройств на энергетических объектах Германии показывает их высокую эффективность и надежность. В зависимости от размещения воздушных фильтров в КВОУ, ИК-обогреватели могут устанавливаться как в горизонтальном (*рис. 2.79а*), так и в вертикальном (*рис. 2.79б*) положении [16].



а)

б)

Рис. 2.79. Размещение ИК-обогревателей в КВОУ ГТУ: а) горизонтальное; б) вертикальное [16]



а) *б)*

Рис. 2.80. Размещение ламп ИК-обогревателей в КВОУ ГТУ: а) схематичное; б) на объекте [16].

Рис. 2.81. Электрическая АОС в КВОУ ГТУ Siemens SGT-300

На *рис. 2.80* показано размещение ламп ИК-обогревателя в КВОУ ГТУ [16]. Лампы к металлоконструкциям КВОУ крепятся так, чтобы со стороны всаса циклового воздуха ГТУ они были защищены от дождя и снега металлическими корпусами, в которых они размещаются, а излучение от них было направлено на воздушные фильтры.

Системы электрического обогрева воздушных фильтров для предотвращения их обмерзания и заноса снегом применяются в основном для ГТУ небольшой мощности. На *рис. 2.81* показана АОС с электрообогревом на двух КВОУ ГТУ Siemens SGT-300 на ГТУ-ТЭЦ ООО «Маяк-Энергия» в Пензе. Система электрообогрева представляет собой ряд трубчатых электронагревателей (ТЭН), установленных в КВОУ ГТУ.

2.5. Системы охлаждения циклового воздуха ГТУ

Известной конструктивной особенностью газотурбинных установок является снижение располагаемой мощности при температурах наружного воздуха выше расчетных. Суть этого явления в том, что работа, затрачиваемая компрессором для сжатия одного и того же объема газа, будет больше при меньшей плотности воздуха. На *рис. 2.82* представлена зависимость выходной мощности и *КПД* ГТУ Siemens SGT5-4000F от температуры воздуха перед ее осевым компрессором [20].

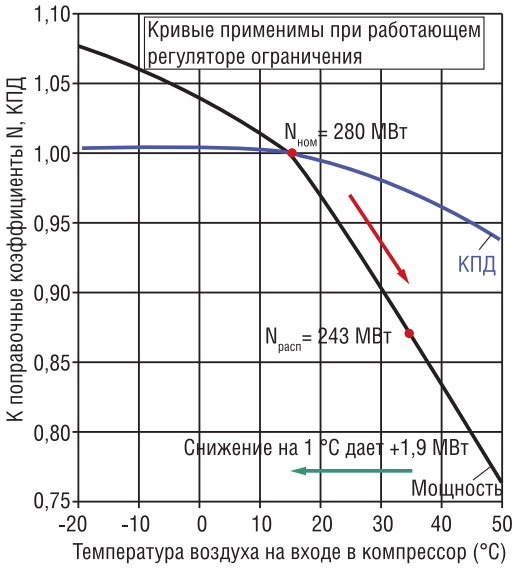


Рис. 2.82. Зависимость выходной мощности и КПД ГТУ Siemens SGT5-4000F от температуры наружного воздуха

При расчетной температуре воздуха +15 °С номинальная мощность ГТУ $N_{ном}$ = 280 МВт и $K_{кпд}$ = 1,0. С ростом температуры воздуха *КПД* и располагаемая мощность ГТУ снижаются. При температуре воздуха +32 °С располагаемая мощность ГТУ $N_{расп}$ составит всего 243 МВт, что приводит к снижению маржинальной прибыли. Особенно это актуально для блоков ПГУ, получающих плату за предоставляемую мощность по тарифам ДПМ (договоры о предоставлении мощности), которые являются механизмом гарантированного возврата инвестиций для новых объектов электрогенерации).

Для минимизации потерь выработки электроэнергии блоками ПГУ, вызванных повышенной температурой окружающей среды, применяют технические решения принудительного охлаждения циклового воздуха ГТУ.

К таким техническим решениям относятся охладительные установки [21]:

– испарительного типа с подачей воды перед системой фильтрации комплексного очистительного устройства (КВОУ) ГТУ (evaporative cooling system);

– с впрыском химически очищенной воды после системы фильтрации КВОУ ГТУ (fogging system) или на всасе в осевой компрессор ГТУ (wet compression);

– с абсорбционными холодильными машинами (АБХМ, absorption chiller);

– с детандер-генераторными агрегатами (ДГА).

Охладительная установка воздуха испарительного типа

Принцип работы охладительной установки воздуха испарительного типа (ОУ ИТ) заключается в снижении температуры всасываемого воздуха перед КВОУ ГТУ за счет его увлажнения подаваемой водой (*рис. 2.83*).

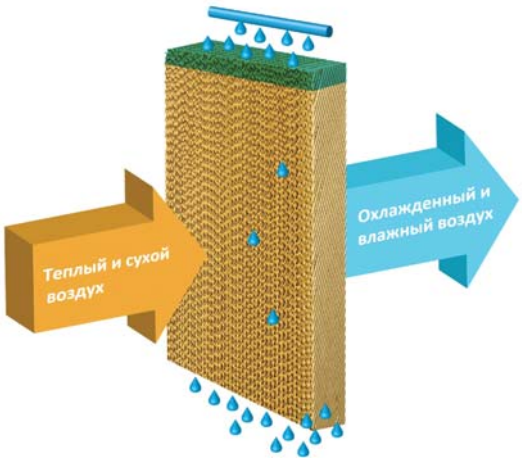


Рис. 2.83. Принцип работы ОУ ИТ (clck.ru/34NvVe)

При испарении воды «мокрый» термометр сравнивается с сухим, и полученное значение соответствует эффективности охлаждения. Таким образом, разность температур двух термометров характеризует эффективность охлаждения воздуха: чем она больше, тем выше эффект. ОУ ИТ проектируется таким образом, чтобы эффективность насыщения всасываемого воздуха влагой превышала 90 %. Процесс охлаждения воздуха в этой установке близок к адиабатическому. Схема, по которой работает система охлаждения воздуха испарительного типа, представлена на *рис. 2.84* [21].

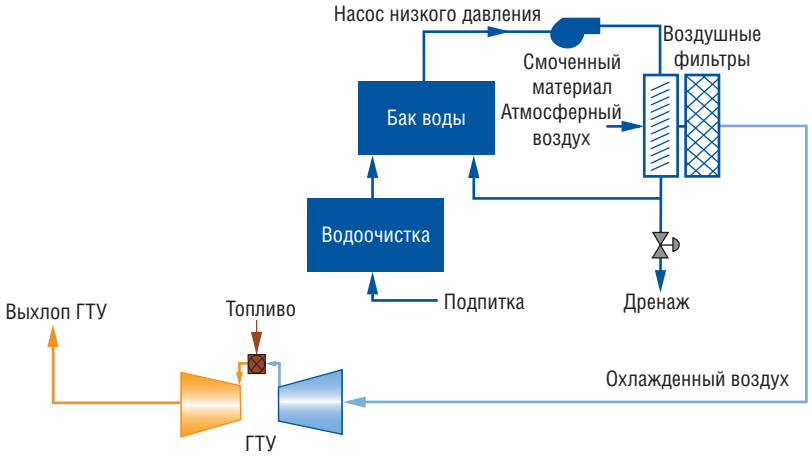


Рис. 2.84. Схема работы ОУ ИТ

ОУ ИТ формируется из нескольких модулей, устанавливаемых перед каждым ярусом и всасом КВОУ ГТУ. Каждый модуль состоит из двух частей: пористого материала кассет (*рис. 2.83*) и установленного за ними каплеуловителя для предупреждения попадания жидких аэрозолей на воздушные фильтры первой ступени очистки циклового воздуха ГТУ. Пройдя систему очистки в КВОУ, цикловой воздух поступает в осевой компрессор ГТУ. Испарившаяся на кассетах ОУ ИТ вода пополняется из бака насосом низкого давления. Для пополнения бака и снабжения модулей ОУ ИТ используется химически очищенная вода (ХОВ). Однако в случае удовлетворительного качества воды, минимизирующей отложения на пористом материале матов, допускается использовать водопроводную воду или воду из артезианских скважин и колодцев.

Такие ОУ ИТ ГТУ эксплуатируются в ООО «ЛУКОЙЛ–Кубаньэнерго» Краснодарской ТЭЦ на энергоблоке ПГУ-410 с ГТУ M701F4 MHI (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd), а также в ПАО «Мосэнерго» в Москве на ГТЭ-160 и Siemens SGT5-4000F.

Преимуществами данной системы являются:

– относительно низкие капитальные затраты;

– относительно небольшие сроки на установку и ввод в эксплуатацию;

– низкие затраты на ремонт и обслуживание системы;

– возможность работы не на ХОВ;

– отсутствие негативного воздействия на проточную часть осевого компрессора ГТУ;

– низкое потребление электроэнергии на собственные нужды.

В качестве недостатков системы можно отметить:

– ограниченную глубину охлаждения воздуха, зависящую от его влажности;

– перепад на смоченном материале может превышать 140 Па в весенне-летний период эксплуатации;

– повреждаемость водораспределительных и испарительных кассет при установке и снятии.

– высокую чувствительность к качеству используемой воды.

Система охлаждения воздуха с впрыском ХОВ

Принцип работы данной системы охлаждения воздуха заключается в распыле деминерализованной воды через специальные форсунки, обеспечивающие генерирование капель необходимого размера 12–20 мкм и образование тумана в потоке воздуха (*рис. 2.85*) [21].

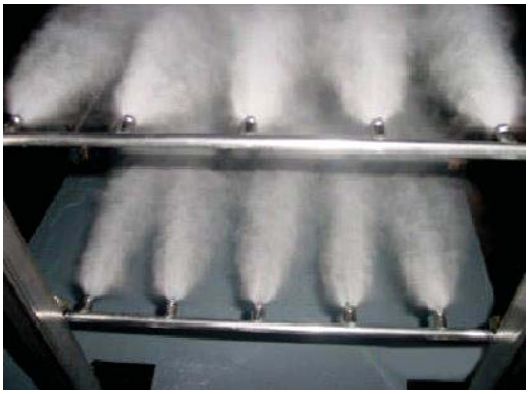


Рис. 2.85. Распыл воды через форсунки [21]

Подача ХОВ в форсунки осуществляется насосом высокого давления порядка 15 МПа с регулируемой частой вращения, что позволяет подавать воду дозированно в зависимости от параметров воздуха. По месту подачи деминерализованной воды различают два способа: за систему фильтрации воздуха КВОУ и перед осевым компрессором ГТУ. Принципиальные схемы этих двух способов подачи ХОВ через форсунки приведены на *рис. 2.86* [21]. В первом случае (*рис. 2.86а*) основной задачей системы является насыщение потока воздуха влажностью более 90 % при одновременном снижении его температуры.

С этой целью систему форсунок для распыла ХОВ размещают на достаточном расстоянии от ВНА осевого компрессора ГТУ, чтобы дать время влаге полностью испариться и предотвратить образование каверн и выбоин на лопатках турбомашины в результате удара капель воды (*рис. 2.87*). Важным компонентом системы охлаждения является система управления процессом, контролирующая расход воды, точное измерение параметров атмосферного воздуха, регулирование и переключение ступеней распыляемой воды высокого давления.

К преимуществам данной системы относятся:

– относительно низкие капитальные затраты;

– относительно небольшие сроки установки и ввода в эксплуатацию;

– незначительное гидравлическое сопротивление;

– более глубокое охлаждение воздуха, чем при использовании системы испарительного типа.

В качестве недостатков следует отметить:

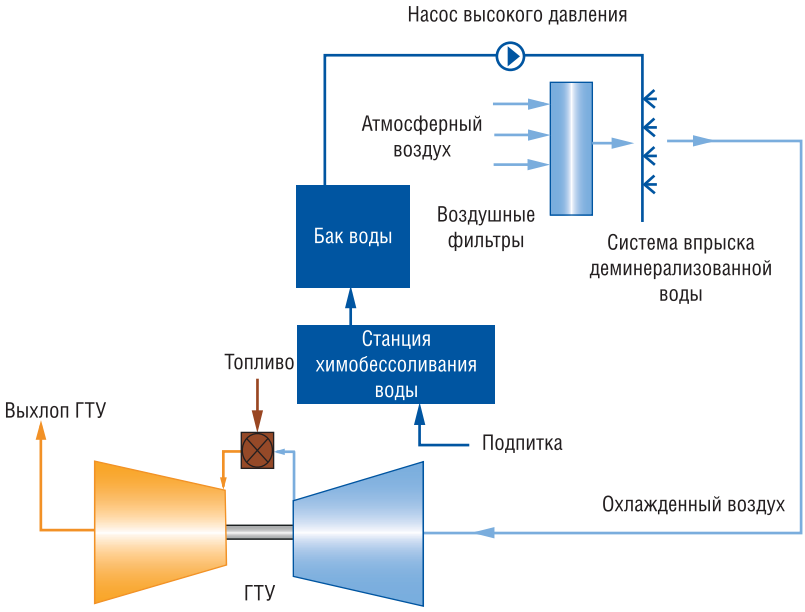
– использование дорогой деминерализованной воды;

– необходимость установки насоса высокого давления (~ 15 МПа);

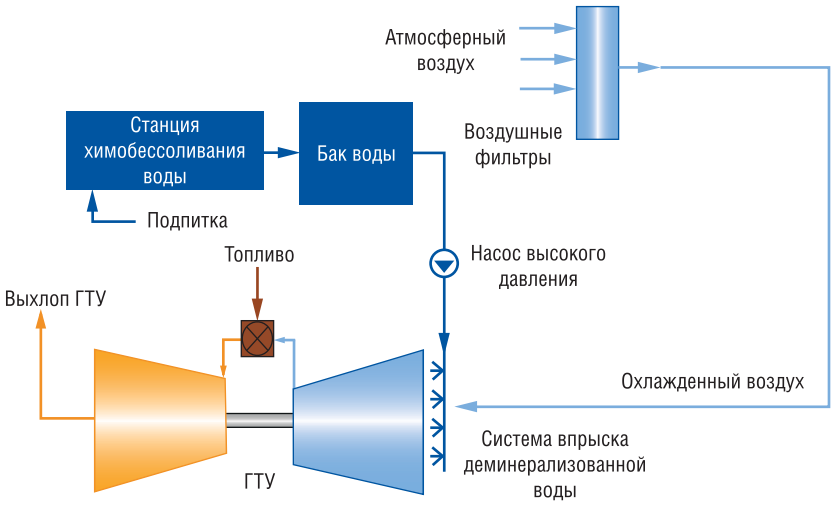
– износ форсунок из-за высокого перепада давления (~ 15 МПа), что может привести к крупнодисперсному распылу, негативно влияющему на проточную часть осевого компрессора ГТУ.

При второй системе подачи ХОВ (*рис. 2.87б*) повышение мощности ГТУ обеспечивается в основном за счет увеличения массового расхода

циклового воздуха на 1,5–2,0 % от номинального значения и практически не зависит от относительной влажности окружающей среды [22–28]. Следует отметить, что размещение форсунок для распыла ХОВ вблизи ВНА осевого компрессора ГТУ потребует модернизации его лопаточного аппарата.



а)



б)

Рис. 2.86. Принципиальная схема системы охлаждения воздуха с впрыском ХОВ: а) после системы фильтрации КВОУ; б) на всасе в осевой компрессор ГТУ

Рис. 2.87. Система подачи ХОВ за фильтрами КВОУ ГТУ [21]

Преимуществами данной системы являются:

– увеличение мощности ГТУ на 4–6 % независимо от влажности атмосферного воздуха;

– сокращение эмиссии NO_x и CO_2 в атмосферу.

Недостатки системы:

– относительно высокие капитальные затраты;

– необходимость модернизации лопаток и проточной системы компрессора ГТУ;

– замена форсунок в среднем через 2–3 года эксплуатации;

– контроль точности отстройки распыла воды от образования капель;

– более активные эрозионные процессы в проточной части ГТУ;

– уменьшение *КПД* комбинированного цикла из-за снижения температуры уходящих газов ГТУ.

Система охлаждения воздуха с бромисто-литиевыми холодильными машинами (АБХМ)

Охлаждение атмосферного воздуха в этой системе происходит за счет теплопередачи от охлажденной среды, протекающей через оребрённую поверхность теплообменника, установленного после АБХМ. Принципиальная схема системы охлаждения циклового воздуха с использованием АБХМ приведена на *рис. 2.88* [21].

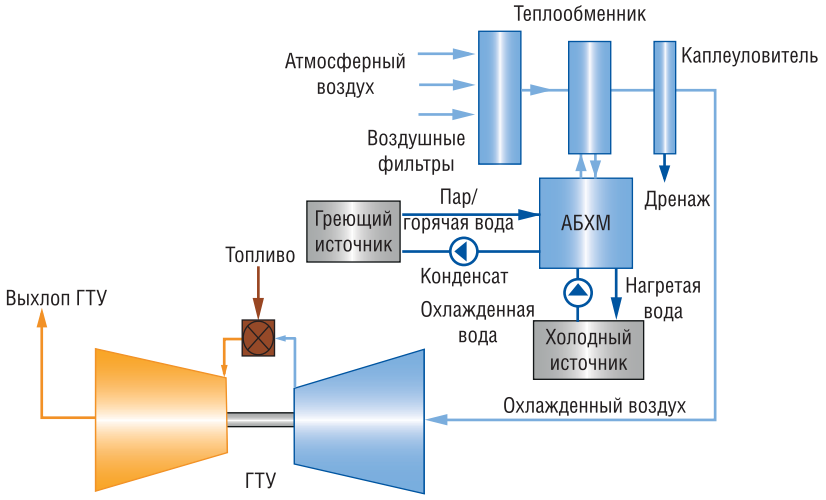


Рис. 2.88. Принципиальная схема системы охлаждения циклового воздуха с АБХМ

АБХМ работает по замкнутому контуру, включающему абсорбер, генератор, конденсатор и испаритель. Рабочим телом холодильной машины является водный раствор бромистого лития. Под воздействием тепла горячей воды или пара в генераторе из раствора бромистого лития выделяются пары воды (хладагента), которые переносятся в конденсатор. Водяной пар конденсируется, отдавая тепло воде охлаждающего контура. Охлажденная вода поступает в испаритель, где при низком давлении закипает при температуре +6 °С и забирает тепло от охлаждаемого контура. Оставшийся концентрированный раствор бромида лития через растворный теплообменник переходит в абсорбер. Для улучшения абсорбции раствор разбрызгивается форсунками и поглощает водяной пар из испарителя.

Процесс абсорбции связан с выделением теплоты, которая отводится охлаждающим контуром в абсорбере. Полученный раствор воды и бромида лития перекачивается в генератор через регулятор/теплообменник, и цикл повторяется снова. Такой принцип охлаждения воздуха успешно применяется в ООО «ЛУКОЙЛ–Астраханьэнерго» для ГТУ General Electric LM6000PF Sprint на энергоблоке ПГУ-235 и на других ТЭЦ [29–32].

Преимуществами применения АБХМ являются:

– увеличение мощности ГТУ независимо от относительной влажности воздуха;

– снижение уровня выбросов CO_2 и NO_x;

– отсутствие негативного воздействия на проточную часть ГТУ;

– низкое электропотребление на собственные нужды.

Недостатки применения АБХМ:

– высокие капитальные затраты на установку;

– относительно высокие затраты на ремонт и обслуживание;

– более высокое аэродинамическое сопротивление в теплообменнике круглогодично.

Система охлаждения с турбодетандерами

Принципиальная схема системы охлаждения циклового воздуха с помощью турбодетандеров представлена на *рис. 2.89*.

Система охлаждения имеет промежуточный контур, связывающий детандер-генераторный агрегат (ДГА) с КВОУ ГТУ. Хладоносителем в промежуточном контуре является этиленгликоль или любой другой агент, имеющей низкую температуру застывания (не выше температуры газа после детандера). Охлаждение происходит за счет теплопередачи

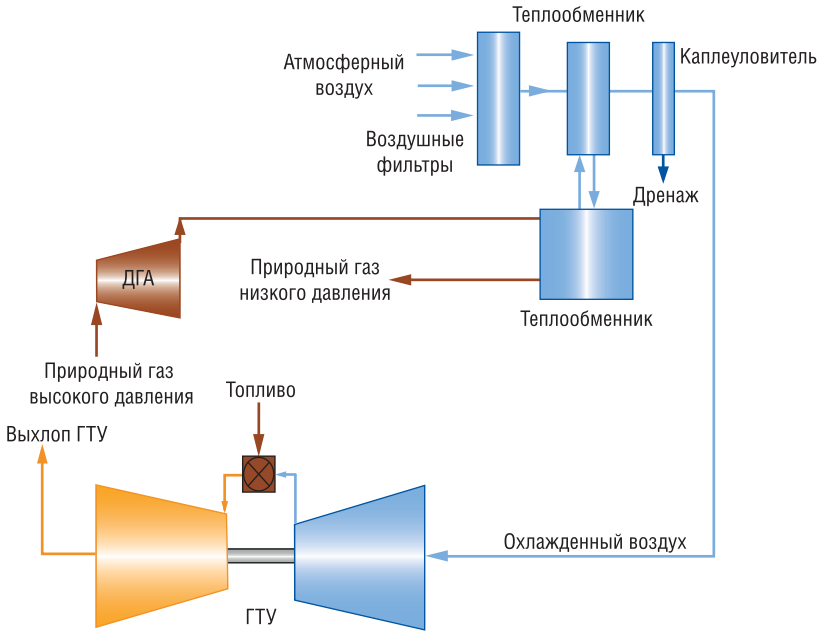


Рис. 2.89. Принципиальная схема системы охлаждения циклового воздуха с помощью турбодетандеров [21]

от хладоносителя промежуточного контура, протекающего через внутреннюю часть теплообменной трубы, к цикловому воздуху, поступающему в КВОУ. Внешняя часть теплопередающих поверхностей должна иметь развитое оребрение. Теплообменные поверхности предпочтительнее устанавливать внутри КВОУ.

Преимущества системы охлаждения воздуха с помощью ДГА [33–35]:

– относительно малые затраты электроэнергии на собственные нужды установки;

– возможность точного регулирования температуры хладоносителя в зависимости от температуры окружающей среды;

– возможность увеличения мощности ГТУ независимо от влажности воздуха;

– дополнительная выработка электроэнергии на ДГА.

Недостатки:

– относительно высокие капитальные затраты;

– применение ограничено электростанциями, на которых необходимо снижать давление природного газа для подачи в паровые котлы;

– необходимость строительства линии циркуляции от ГРП до КВОУ ГТУ.

– увеличение гидравлического сопротивления воздушного тракта круглогодично.

Резюме

Выбор системы охлаждения воздуха для энергетических ГТУ должен осуществляться в результате тщательного анализа климатических условий региона, технико-экономического анализа оборудования, воды, расчета финансовой модели проекта и его окупаемости.

Ветры дуют не так, как хотят корабли

Арабская пословица

Глава 3
СИСТЕМЫ ФИЛЬТРАЦИИ ЦИКЛОВОГО ВОЗДУХА ГТУ

Выбор системы фильтрации циклового воздуха ГТУ в соответствии с документом «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок» должен осуществляться с учетом климатических условий, в которых будет эксплуатироваться электростанция. В документе также приведена таблица рекомендаций по комплектации КВОУ для энергетических ГТУ, используемых на объектах РАО «ЕЭС России». Исходя из этих рекомендаций на территории России повсеместно необходимо использование статической системы фильтрации КВОУ, за исключением районов пустынь, где целесообразно применение импульсной системы.

Изредка отмечаются случаи, когда песчаные бури накрывают и наши города, расположенные вне пустынных территорий. Так, 16 мая 2019 года небо над Благовещенском (Амурская обл.) 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 песка, поднятые ветром из пустыни Гоби, частично достигли Благовещенска и накрыли город (*рис. 3.1*).

Рис. 3.1. Песчаная буря в Благовещенске (clck.ru/34dHnv)

Однако такие события случаются достаточно редко и представляют собой скорее форс-мажор, чем системные явления. В нашей стране территория, занятая пустынями, чрезвычайно мала, поэтому импульсная очистка должна быть исключением из правил.

3.1. Импульсные системы очистки воздуха энергетических ГТУ

Воздушные фильтры с импульсной очисткой были разработаны после случаев остановки оборудования в связи с резким повышением перепада давления на фильтрующих системах из-за полного их блокирования песком во время песчаных бурь на Ближнем Востоке. На *рис. 3.2* зафиксировано состояние окружающей среды в одном и том же месте Кувейта при обычных климатических условиях и во время песчаной бури [1].

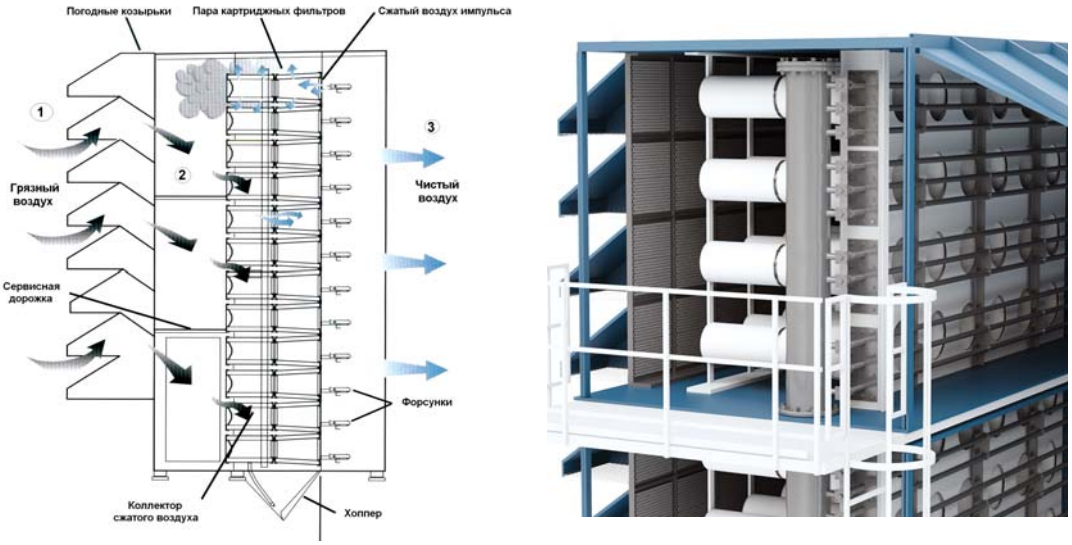
а) *б)*

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 климатических условиях фильтры импульсного типа работают достаточно хорошо. На *рис. 3.3* изображена типовая схема и принцип работы КВОУ ГТУ с фильтрами импульсной очистки.

В процессе работы ГТУ атмосферный воздух всасывается через погодные козырьки, проходит очистку в фильтровальном отделении КВОУ (коагулятор, импульсные фильтры) и через воздуховод 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 через хоппер поступают в специальные емкости для их сбора.

В условиях невысокой запыленности окружающей среды, особенно при наличии в воздухе несгоревших углеводородов, морской соли, работа таких фильтров не может считаться удовлетворительной. На *рис. 3.4* показан эрозийный износ лопаток осевого компрессора ГТУ Siemens V94.2A в Омане при использовании в системе фильтрации воздуха КВОУ импульсных фильтров [1].



а) *б)*

Рис. 3.3. КВОУ ГТУ с фильтрами импульсной очистки:
а) принцип работы; б) 3D КВОУ
(рис. из буклета компании Freudenberg Filtration Technologies)

До появления документа «Общие технические требования 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 ТЭЦ подробно изложен в работах [1–4].

Рис. 3.4. Эрозийный износ лопаток компрессора ГТУ V94.2A

В 1998 году импульсная система очистки воздуха для ГТУ GT8C мощностью 50 МВт была установлена в Санкт-Петербурге на Южной ТЭЦ (сейчас ПАО «ТГК-1»). Поставщиком оборудования являлась компания ABB (Asea Brow Bower). При расходе воздуха ГТУ 183 кг/с КВОУ было оснащено 192 коническими P19-1281 и цилиндрическими P19-1280 фильтрами. Для подачи сжатого воздуха в систему импульсной очистки (на продувку фильтров) КВОУ было оборудовано

отдельно стоящим компрессором фирмы Atlas Copco [1]. За время эксплуатации наработка ГТУ составила примерно 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 GT8C из-за загрязнения проточной части компрессора ГТУ перестала эксплуатироваться и находилась в резерве в течение нескольких лет. Впоследствии, при модернизации Южной ТЭЦ и оснащении ее энергоблоком ПГУ, ГТУ GT8C была демонтирована.

В декабре 2004 года в опытно-промышленную эксплуатацию были запущены два энергоблока Сочинской ТЭС. В их состав входят ГТУ GT-10C (Siemens) мощностью 28,3 МВт, расходом воздуха – 88,3 кг/с, *КПД* – 35,5 %. ГТУ оснащены КВОУ с двухсторонним всасом атмосферного воздуха (*см. рис. 2.1*) и импульсной системой очистки фильтров (*рис. 3.5а*). Для увеличения продолжительности безотказной работы КВОУ и продления срока службы персоналом Сочинской ТЭС проводились регулярные очистки фильтров промышленным пылесосом (1 раз в 2 месяца). Работы совмещаются с ежемесячной промывкой проточной части компрессора [2]. Поставка КВОУ для Сочинской ТЭС произведена без устройства по предупреждению налипания снега на входном диффузоре (козырек рециркуляции горячего воздуха). Как показали события нескольких зим (сильнейшие снегопады и обледенение, приведшие к нарушению энергоснабжения Сочи), такое конструктивное решение не является оптимальным.

Санкт-Петербург и Сочи – приморские города, атмосферный воздух в них характеризуется повышенной влажностью и большим содержанием морской соли. Трудно предположить, какие соображения повлияли на выбор импульсных фильтров из прессованной целлюлозно-синтетической смеси для очистки циклового воздуха ГТУ ТЭЦ, работающих в прибрежных (on shore) зонах.

Априори воздушные импульсные фильтры предназначены для очистки циклового воздуха ГТУ, эксплуатирующихся в условиях пустынь.

В октябре 2013 г. в строй была введена Джубгинская ТЭС, построенная в соответствии с «Программой строительства олимпийских объектов и развития города Сочи как горноклиматического курорта», утвержденной Постановлением Правительства РФ от 29 декабря 2007 г. № 991. Установленная электрическая мощность станции составляет 198 МВт. Станция оборудована двумя ГТУ LMS-100 PB производства General

а)

б)

Рис. 3.5. Фильтры импульсной очистки:
а) на Сочинской ТЭС;
б) на Джубгинской ТЭС

Electric. На *рис. 3.6* изображено КВОУ ГТУ LMS 100 PB с импульсными фильтрами (*рис. 3.5б*).

В отличие от 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. Обе ТЭС принадлежат АО «Интер РАО Электрогенерация».

В состав ПАО «Юнипро» входят две ГРЭС с ПГУ, на которых установлены идентичные КВОУ с импульсной системой очисткой циклового воздуха ГТУ PG 935FA GE Energy, это Сургутская ГРЭС-2 и Шатурская ГРЭС (*рис. 3.7*) [3].

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 Сургуте Ханты-Мансийского автономного округа Тюменской области, в центральной части Западно-Сибирской равнины, в среднем Приобье. Климат района резко континентальный, характеризуется суровой продолжительной зимой и коротким, относительно теплым летом.

Энергоблок ПГУ-800 расположен на водораздельном склоне рек Оби и Черная, в долине реки Черная у водохранилища. Это обуславливает по-

Рис. 3.6. КВОУ ГТУ LMS 100 РВ Джубгинской ТЭС (https://clck.ru/33anno)

вышенную влажность воздуха от испарения как в летний, так и в зимний период из-за подогрева воды водохранилища Сургутской ГРЭС-2.

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

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

На Сургутской ГРЭС-2 превалирующим является западное и юго-западное направления ветров, которые дуют со стороны водохранилища, принося с собой капельную влагу. В процессе эксплуатации двух энергоблоков ПГУ отмечалось попадание атмосферной влаги на импульсные фильтры КВОУ [3]. На *рис. 3.7б* отчетливо видны следы подтеков воды по фронтальной поверхности фильтров (указано красной стрелкой).

Следует отметить, что на каждом фильтре GE написано предупреждение: «DO NOT WASH» – «НЕ МЫТЬ», поскольку их фильтровальный материал представляет собой целлюлозно-синтетическую смесь, которой влага противопоказана. Попадание атмосферной влаги на импульсные фильтры говорит о следующем:

– погодные козырьки и влагоотделитель (коагулятор) КВОУ не предотвращают попадания влаги из атмосферного воздуха;

а)

б)

Рис. 3.7. КВОУ и фильтры ГТУ PG935FA GE:
а) КВОУ Шатурской ГРЭС;
б) импульсные фильтры КВОУ Сургутской ГРЭС-2

– применение импульсных фильтров, которым противопоказана любая влага, для КВОУ ГРЭС, работающей на берегу водохранилища, является неоправданным;

– на этапе проектирования ПГУ Сургутской ГРЭС-2 не была учтена «роза ветров», в результате чего КВОУ расположены на неблагоприятном направлении ветра.

В процессе мониторинга окружающей среды Сургутской ГРЭС-2 и Шатурской ГРЭС было установлено, что количество мелкодисперсных частиц размером 0,3–1 мкм в атмосферном воздухе этих электростанций более 99 %. В то же время паспортные данные компании GE показывают эффективность новых импульсных фильтров 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 турбомашины (*рис. 3.8*).

Чтобы этого избежать, строго рекомендуется поместить за фильтрами импульсной очистки конечную ступень эффективных статических фильтров группы EPA класса E10 для необходимой защиты компрессора ГТУ (*рис. 3.9*).

Если этого не сделать, то уже через год эксплуатации можно получить картину сильного загрязнения и эрозийного износа компрессорных лопаток, как на осевом компрессоре GE PG935FA Шатурской ГРЭС (*см. рис. 3.8*).

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

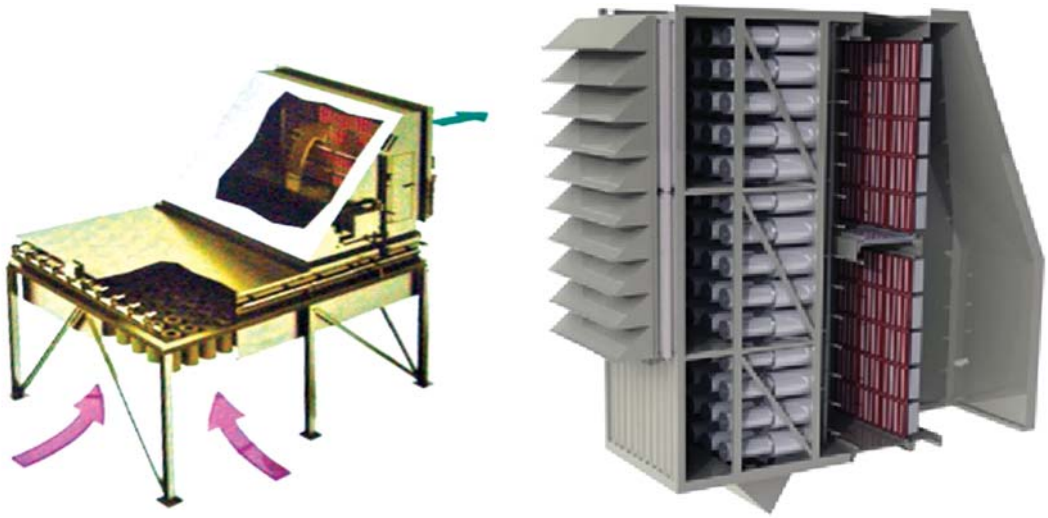
– в экстремальных условиях пыльных бурь импульсные фильтры работают эффективно, в обычных климатических условиях их эффективность мала;

Рис. 3.8. Лопатки ВНА компрессора GE PG935FA Шатурской ГРЭС [3]

– 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 стекловолокна 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.



а) *б)*

Рис. 3.9. КВОУ с импульсными и статическими фильтрами, всас: а) снизу; б) осевой (рис. из буклета компании Camfil Svenska)

3.2. Статические системы очистки воздуха энергетических ГТУ

Оснащение КВОУ определенной системой фильтрации и количеством ступеней очистки циклового воздуха ГТУ зависит от региона локации электростанции. На *рис. 3.10* представлена система фильтрации КВОУ, состоящая из жалюзийного каплеуловителя, карманного фильтра грубой очистки (ФГО) / средней очистки (ФСО) и кассетного фильтра тонкой очистки (ФТО).

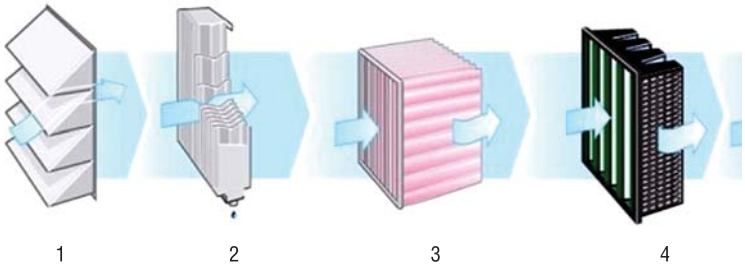


Рис. 3.10. Система фильтрации циклового воздуха ГТУ:
1 – погодные козырьки, 2 – жалюзийный каплеуловитель, 3 – карманный ФГО/ФСО, 4 – кассетный ФТО (рис. из буклета компании Camfil Svenska)

Капельная влага удаляется в стационарном каплеуловителе КВОУ. Каплеуловитель отклоняет насыщенный каплями поток воздуха, в результате чего капли по инерции сталкиваются с поверхностью профильных пластин, сливаются вместе и образуют жидкую пленку, которая под действием силы тяжести стекает вниз по пластинам. Специальная конструкция профилей повышает эффективность каплеуловителей, от-

а) *б)*

Рис. 3.11. Каплеуловители влаги компании Munters: а) профиль; б) в КВОУ ГТУ

деление более мелких капель и обеспечивает свободное стекание жидкости (*рис. 3.11*). Очищенный от капельной влаги атмосферный воздух поступает в фильтры грубой (класс G2–G4) или средней (класс M5–M6) очистки (согласно ГОСТ Р ЕН 779-2014), где частицы крупно- и среднедисперсных частиц задерживаются (согласно стандарта ISO 29461-1-2021 класс T2–T4 и класс T5–T6 соответственно). Дальнейшая очистка циклового воздуха ГТУ осуществляется в фильтрах тонкой очистки. Класс очистки конечных (финишных) фильтров в зависимости от концентрации и дисперсности частиц в воздухе может варьироваться от F до E.

Такие системы очистки воздуха по количеству ступеней воздушных фильтров называются двухступенчатыми. Они обычно применяются в ГТУ, работающих в условиях умеренной влажности и запыленности воздуха (*рис. 3.12*).

Для более сложных, с климатической точки зрения, условий применяются трехступенчатые системы фильтрации воздуха (*рис. 3.13*) [4].

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, а третью ступень представляют фильтры класса E10–E12 согласно ГОСТ Р Н 1822-1-2010 (согласно стандарта ISO 29461-1-2021 класс T7–T9 и класс T10–T12 соответственно). Такая же система фильтрации

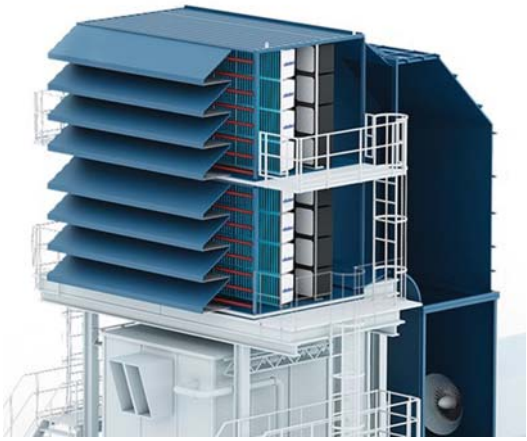


Рис. 3.12. 3D КВОУ с двухступенчатой системой фильтрации и ИК-обогревателями (рис. из буклета компании Freudenberg Filtration Technologies)

Рис. 3.13. Трехступенчатая система фильтрации циклового воздуха ГТУ: 1 – погодные козырьки; 2 – жалюзийный каплеуловитель; 3 – карманный ФГО; 4 и 5 – кассетный ФТО

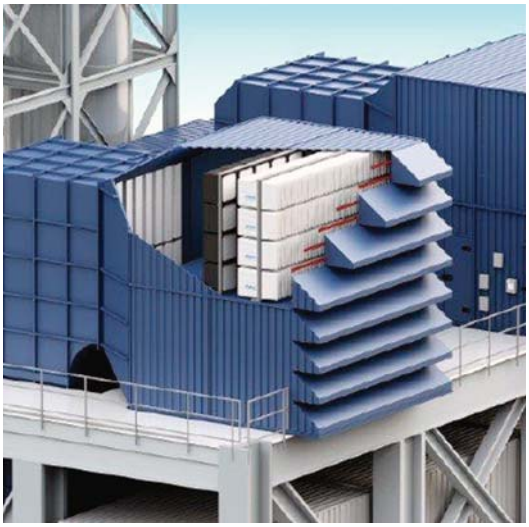


Рис. 3.14. 3D КВОУ с трехступенчатой системой фильтрации и ИК-обогревателями (рис. из буклета компании Freudenberg Filtration Technologies)

циклового воздуха ГТУ применяется и при отсутствии в КВОУ штатных каплеуловителей. В этом случае в качестве фильтров первой ступени используются фильтры, обладающие качествами и фильтра-коагулятора, и фильтра грубой/средней очистки. Такими сейчас являются фильтры, изготовленные по технологии Drop Save. Вместо каплеуловителей в КВОУ ГТУ могут быть установлены теплообменные аппараты или инфракрасные обогреватели, как это показано на *рис. 3.14.*

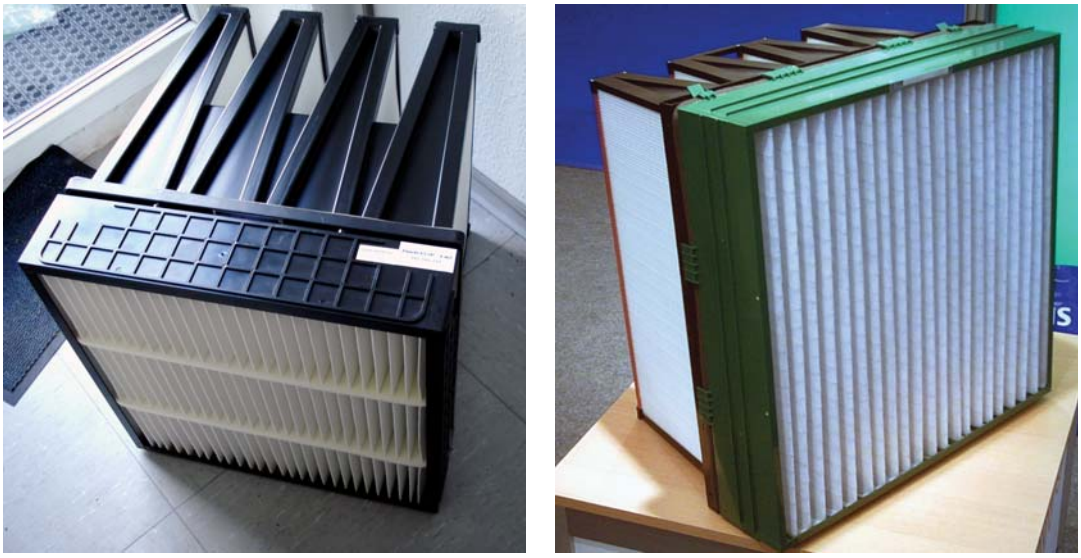
С ростом количества ступеней фильтрации осевые размеры КВОУ увеличиваются, растут массогабаритные показатели и стоимость этого оборудования. Поэтому для

а) *б)*

Рис. 3.15. Короба комбисистем: а) компании FAIST AIS из нержавеющей стали; б) компании Mikropor из пластмассы

снижения этих показателей изготовители ВЗТ объединяют вместе две ступени фильтрации в одну, таким образом сокращая осевые размеры КВОУ. Размещаются обе ступени фильтрации в штатных, поставляемых с КВОУ коробах из нержавеющей стали (*рис. 3.15а*) или прочной пластмассы (*рис. 3.15б*). В другом случае фильтры один к другому крепятся штырями или защелками, образуя единую комбинированную систему.

На *рис. 3.16* изображены комбинированные системы разных производителей, состоящие из ФГО на первой ступени и ФТО на второй ступени.



а) *б)*

Рис. 3.16. Комбинированные системы фильтрации ФГО и ФТО: а) компании Eagle Filters; б) компании Camfil Svenska

Конструктивно КВОУ ГТУ сформированы из нескольких модулей, состоящих из секций, в которых размещаются: оборудование (трубопроводы) противообледенительной системы, сама АОС (например, в виде теплообменного аппарата), фильтры-коагуляторы, фильтры предварительной очистки и фильтры тонкой очистки, представляющие финишную систему фильтрации циклового воздуха ГТУ.

В соответствии с документом «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок» РАО «ЕЭС России» высота модулей КВОУ не должна превышать 2200 мм. Этому требованию полностью соответствует технология VARIPAC™, разработанная иностранными инженерами. Применение технологии VARIPAC™ при изготовлении КВОУ позволяет осуществлять замену

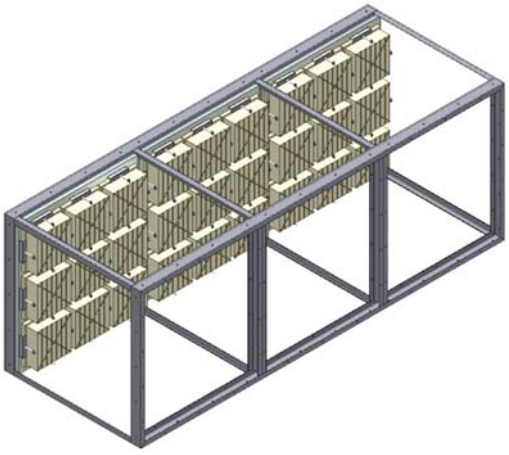
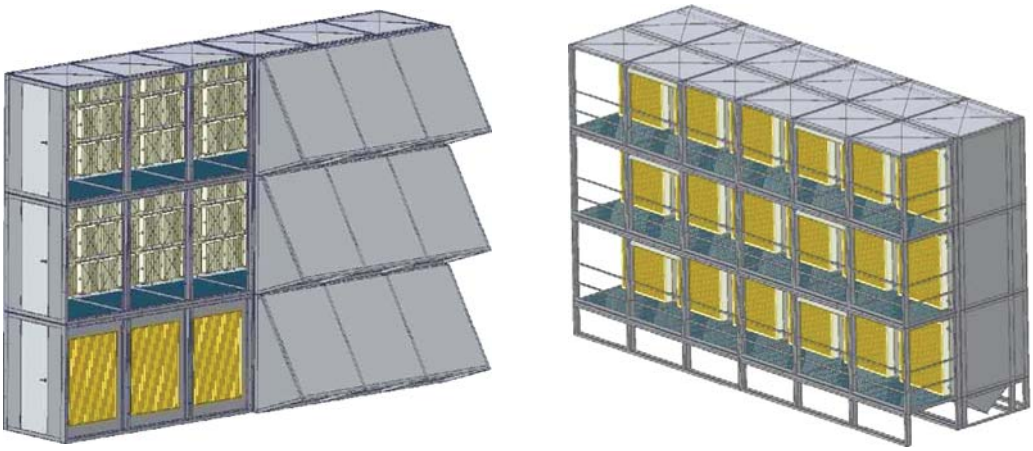


Рис. 3.17. Базовый модуль технологии VARIPAC™; габариты (В×Ш×Д, мм) = 2200×2200×5650

фильтров одному человеку, в то время как на Северо-Западной ТЭЦ в этой процедуре задействованы двое, а на Калининградской ТЭЦ-2 – трое. Это обусловлено тем, что высота модулей КВОУ поставщиков для Siemens ГТУ составляет 3 метра. Очевидно, что трудоемкость обслуживания КВОУ в данном случае в несколько раз ниже, чем на отечественных ТЭЦ. Такое преимущество технологии VARIPAC™ достигается разумным выбором размеров каркаса модуля (*рис. 3.17*) [5].

Высота модуля 2,2 м позволяет человеку среднего роста заменять воздушные фильтры и проводить техническое обслуживание оборудования КВОУ без посторонней помощи. Габариты подобраны так, чтобы транспортировать полностью оснащенный электротехническим и механическим оборудованием модуль в 20- и 40-футовых контейнерах любым видом транспорта, включая морской. Другим важным аспектом этой технологии является логистика, минимизация времени и денежных затрат на транспортировку и установку КВОУ после его изготовления. Не имеет смысла конструи-



а) *б)*

Рис. 3.18. КВОУ для ГТУ Siemens V64.3A, составленные из базовых модулей VARIPAC™: а) для статической; б) для импульсной очистки воздуха [5]

ровать большие воздухоприемные секции для экономии времени при возведении КВОУ, если стоимость их транспортировки в конечном итоге будет выше и сама транспортировка займет больше времени.

На *рис. 3.18* приведены КВОУ с односторонним всасом для ГТУ Siemens V64.3A, составленные из шести базовых модулей VARIPAC™ для статической и импульсной двухступенчатой системы фильтрации воздуха. Габариты обоих КВОУ (В×Ш×Д, мм) = 6600×3700×11700. Система фильтрации циклового воздуха ГТУ для КВОУ со статическими фильтрами состоит из 168 фильтр-элементов [5].

На «чистой» стороне КВОУ, за фильтрами тонкой, финишной очистки, устанавливаются глушители шума, снижающие генерируемый компрессором ГТУ шум до санитарных норм, и воздуховоды, по которым очищенный в КВОУ воздух поступает на всас турбомашины (*см. рис. 3.14*). В зависимости от длины горизонтального воздуховода (расстояние от КВОУ до расположения всаса ГТУ в машинном зале) глушитель шума устанавливается либо сразу за фильтрами финишной очистки воздуха (короткий горизонтальный воздуховод), либо в конце горизонтального воздуховода (длинный горизонтальный воздуховод). От размера горизонтального воздуховода в значительной степени зависят массогабаритные показатели ВЗТ и его стоимость.

Резюме

Правильный выбор системы фильтрации для каждого конкретного КВОУ зависит от места эксплуатации ГТУ. С этой целью необходимо организовать постоянный мониторинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ, который позволит учесть влияние как атмосферных источников загрязнения воздуха, так и рукотворных. В зависимости от полученных результатов концентрации и дисперсности частиц необходимо выбирать тип системы фильтрации, количество ступеней фильтрации и класс очистки.

3.3. Конструкция воздухозаборного тракта энергетической ГТУ

В *главе 2* были рассмотрены устройства, комплектующие КВОУ энергетических ГТУ в соответствии с документом «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок» РАО «ЕЭС России», а также их эксплуатация на действующих энергетических объектах в различных странах и климатических условиях.

В первых частях *главы 3* показаны две системы очистки циклового воздуха ГТУ, используемые на электростанциях различных генерирующих

компаний. В данном разделе мы познакомимся с конструкцией воздухозаборного тракта со статической системой очистки циклового воздуха КВОУ на примере ВЗТ компании FAIST AIS для ГТУ Siemens SGT5-2000E [6]. Рассмотрим особенности конструкции ВЗТ с длинным и коротким горизонтальным воздуховодом, от осевых размеров которого существенно зависят массогабаритные показатели и стоимость оборудования.

Выбор ВЗТ со статической системой фильтрации воздуха в КВОУ в качестве объекта ознакомления обусловлен тем, что в соответствии с природно-климатическими условиями нашей страны импульсная система очистки воздуха может применяться только в исключительных случаях в специфических условиях. Кроме того, рассматриваемая конструкция ВЗТ успешно эксплуатируется в нашей стране уже в течение нескольких лет и полностью соответствует требованиям РАО «ЕЭС России».

Описание воздухозаборного тракта

Общий вид воздухозаборного тракта (ВЗТ) представлен на *рис. 3.19* и *3.20*.

Однако, как отмечалось ранее, существуют воздухозаборные тракты и с коротким горизонтальным воздуховодом (*рис. 3.21*).

Особенностью таких ВЗТ является то, что сразу после направляющего короба устанавливается шумоглушитель, который, в свою очередь, служит переходником от КВОУ к угловому воздуховоду.

Рассмотренные воздухозаборные тракты энергетических ГТУ по комплектации соответствуют требования РАО «ЕЭС России» и состоят из:

– погодных козырьков;
– защитных сеток от птиц;
– теплообменного аппарата;
– фильтрующего модуля, включающего противомоскитные сетки, коагуляторы, фильтры грубой и тонкой очистки (КВОУ);
– кровли;
– воздуховодов;
– глушителя шума;
– дверей;
– лебёдки.

КВОУ

В основном КВОУ состоит из ступеней фильтрации, которые формируют три из четырёх стен корпуса. В нижней части корпус крепится болтами к горизонтальному воздуховоду. Платформы и лестницы сконструированы таким образом, чтобы обеспечить легкий и эффективный

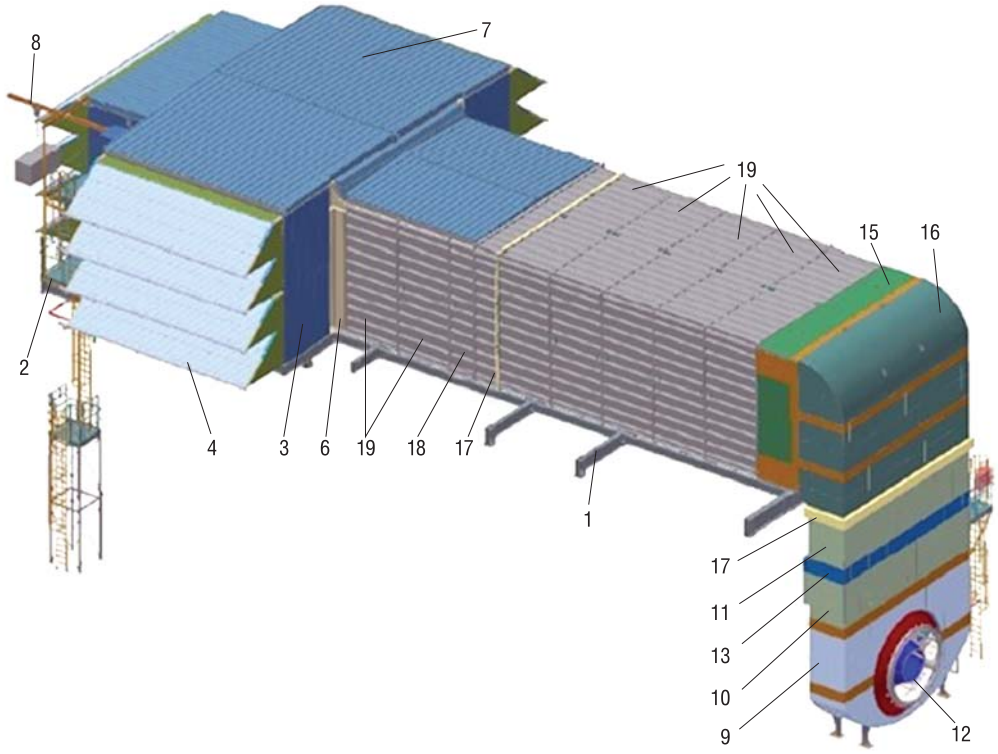


Рис. 3.19. Общий вид воздухозаборного тракта SGT5-2000E с длинным горизонтальным воздуховодом со стороны ГТУ:
1 – опорная конструкция; 2 – платформы и лестницы фильтрующего модуля; 3 – фильтрующий модуль; 4 – погодные козырьки; 5 – дверь фильтрующего модуля; 6 – направляющий короб; 7 – изоляция крыши; 8 – лебёдка; 9 – выходной воздуховод; 10 – воздуховод запорной заслонки; 11 – промежуточная часть; 12 – воздуховод подвода воздуха к ГТУ; 13 – воздушная заслонка (шибер); 14 – защита вала генератора; 15 – глушитель шума; 16 – угловой воздуховод; 17 – температурный компенсатор; 18 – горизонтальный воздуховод; 19 – секции горизонтального воздуховода; 20 – система подогрева воздуха

доступ для выполнения всех необходимых операций. Для подъема оборудования и фильтров на КВОУ монтируется грузовая лебедка. Контрольно-измерительные приборы установлены снаружи на платформе КВОУ в отдельном помещении (шкафу управления) так, чтобы к ним был легкий доступ.

Целью является контроль состояния воздухозаборного тракта: КВОУ, запорной заслонки.

Воздух поступает в КВОУ с трех сторон через защитные сетки от птиц, мусора и двукрылых насекомых и фильтрующие модули. Все входные отверстия модулей снабжены погодными козырьками для защиты от дождя и неблагоприятных погодных условий.

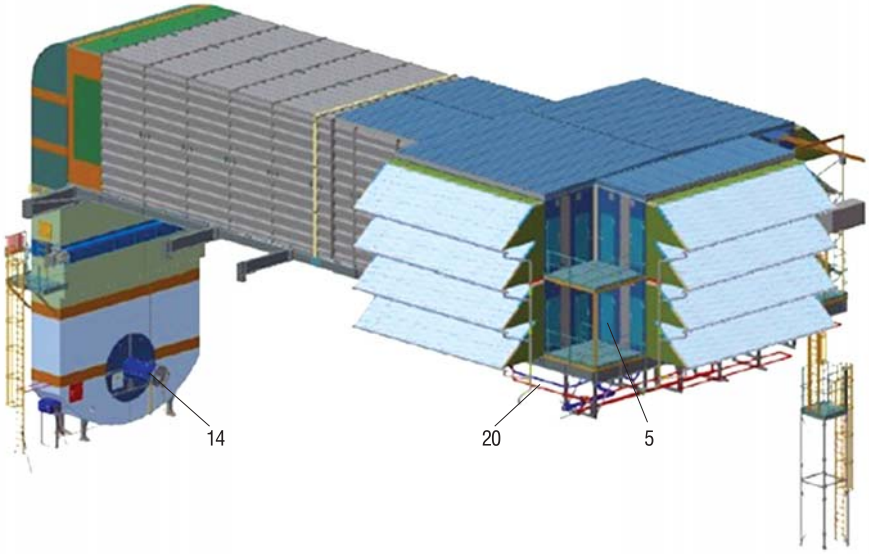


Рис. 3.20. Общий вид воздухозаборного тракта SGT5-2000E с длинным горизонтальным воздуховодом со стороны всаса (поз. 5. 14, 20 см. рис. 3.19)

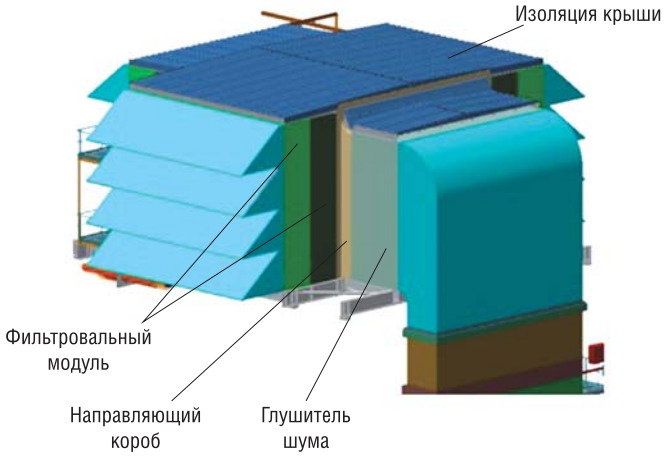


Рис. 3.21. Общий вид ВЗТ с коротким горизонтальным воздуховодом

Погодные козырьки

Рассмотрим основные элементы ВЗТ. Первым его элементом по всасывающемуся потоку воздуха являются погодные козырьки (*рис. 3.22*).

Снеговые погодные козырьки сконструированы из металлического обшивочного листа трапециевидного профиля с достаточным равномерным наклоном и длиной для защиты ВЗТ от атмосферных осадков в виде дождя и снега.

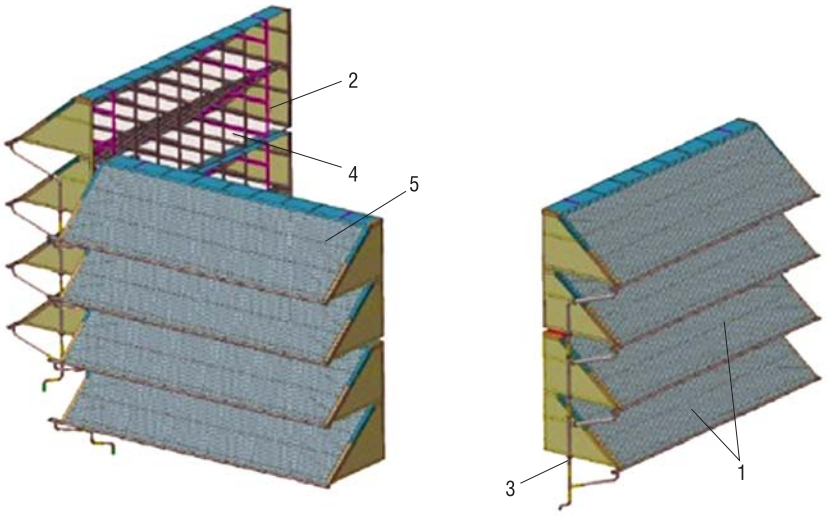


Рис. 3.22. Погодные козырьки: 1 – погодные козырьки; 2 – алюминиевые профильные балки; 3 – водосточный желоб; 4 – защитный экран от птиц; 5 – металлический обшивочный лист

Антиобледенительная система

Для предотвращения образования наледи на поверхностях воздухозаборного тракта перед фильтрами устанавливается система подогрева воздуха. Теплообменные аппараты спроектированы для требуемых внешних условий и расположены в специальных модулях. Система предварительного подогрева воздуха включается в работу в зависимости от точки росы окружающего воздуха и температуры на входе в компрессор. Она защищает фильтры и воздуховод от обледенения во время работы в диапазоне температур возникновения обмерзания и предварительного нагрева ротора при скорости вращения и скорости автономной промывки. Система также используется для защиты от обледенения и дополнительно для предварительного подогрева ротора до минимальной температуры –30 °С. Температура подаваемой смеси воды и этиленгликоля регулируется в соответствии с температурой воздуха на входе в компрессор. Система предварительного подогрева, работающая на смеси воды и гликоля, обеспечивает ГТУ предварительно нагретым цикловым воздухом во время эксплуатации при низких температурах. Принцип действия заключается в нагреве всасываемого воздуха с помощью теплообменников для смещения температуры всасываемого воздуха за пределы диапазона точки росы, приводящей к образованию льда.

Общие данные и спецификация для холодных условий окружающей среды *Таблица 3.1*

Тип ГТУ	SGT5-2000E
$T_{окр}$ в режиме антиобледенения, °C	–2...11
$T_{окр}$ в режиме предварительного подогрева ротора, °C	–32...20
Массовый расход воздуха при +5 °C, кг/с: – на холостом ходу – при полной нагрузке	 мин. 381 / макс. 544 мин. 400 / макс 568
Δp на воздушной стороне трубчатого оребрённого теплообменника, мбар	<1
Минимально допустимая температура на входе компрессора на остановленной ГТ, °C	–32
Минимально допустимая температура на входе компрессора при работе ГТУ, °C	> –30
Максимальная температура теплоносителя на входе в теплообменник, °C	90
Максимально допустимое рабочее манометрическое давление теплоносителя, бар	10
Перепад давления в АОС, Па	30

Система предварительного подогрева состоит из следующих компонентов:

– теплообменные аппараты в КВОУ;
– распределительные трубы внутри КВОУ и под ним;
– распределительные трубы к КВОУ (другие);
– платформа насоса в машинном зале;
– трубные узлы (впускные и выпускные);
– измерительные приборы системы мониторинга и управления, а также кабели и клапаны.

Теплообменный аппарат состоит из медных труб и ребер с шагом 3 мм. Ребра изготовлены из алюминиевого сплава с эпоксидным покрытием. Все трубы (вне КВОУ) с температурой >60 °C снабжены теплоизоляцией.

Конструктивные данные воздухоподогревателя с теплоносителем вода/этиленгликоль *Таблица 3.2*

Максимальная температура теплоносителя на входе в теплообменник, °C	90
Максимальное давление, бар	10
Максимально допустимый перепад давления со стороны воздуха, Па	100
Максимально допустимый перепад давления со стороны жидкости, бар	1,0
Максимально допустимая температурная неравномерность нагретого воздуха, К/мин	± 2

Технологические параметры воздухоподогревателя ***Таблица 3.3***

Минимальная температура окружающей среды, °С		–32
Т подогрева воздуха, °С:	Режим предварительного подогрева ротора	мин. +20,0/ макс. +20,0
	Режим антиобледенения	мин. –2,0/ макс. 11
Раствор этиленгликоль / вода, %		45 / 55
Расход раствора, $м^3$/ч		183
Объём системы, куб. м		~1,25
Перепад давления между подающим/ обратным фланцем, бар		Макс. 4 (во время эксплуатации) при +5 °С (запуск)
Диапазон рабочих температур подачи теплоносителя, °С		+16,8... 90,0 (зависит от режима работы)
Диапазон рабочих температур возврата теплоносителя, °С		+10,3... 74,0 (зависит от режима работы)
Максимальная мощность источника тепла Блок 11 / Блок 21, МВт		3,3 / 3,445
Максимальный градиент теплотворной способности источника тепла, МВт/мин		± 4
Максимальный градиент отключения источника тепла, кВт/с		–500 (отключение источника тепла через 60 с)

Принципиальная схема АОС КВОУ ГТУ приведена на *рис. 3.23.*

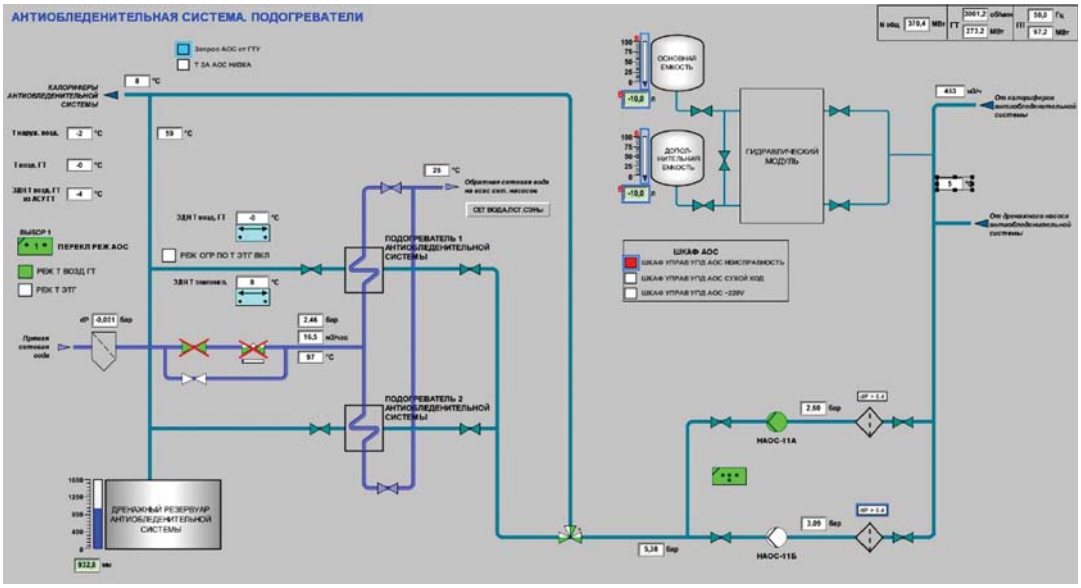


Рис. 3.23. Принципиальная схема АОС КВОУ ГТУ

Фильтрующий модуль

После погодных козырьков воздух направляется в фильтрующий модуль КВОУ, где установлены теплообменный аппарат, фильтры грубой, средней и тонкой очистки воздуха. Доступ к фильтрам осуществляется с помощью дверей фильтрующего модуля, которые всегда должны быть плотно закрыты при эксплуатации КВОУ (*рис. 3.24а*). В каждом фильтрующем модуле предусмотрены сервисные дорожки, позволяющие устанавливать и снимать фильтр-элементы каждой ступени очистки воздуха и проводить обслуживание элементов фильтрующего модуля.

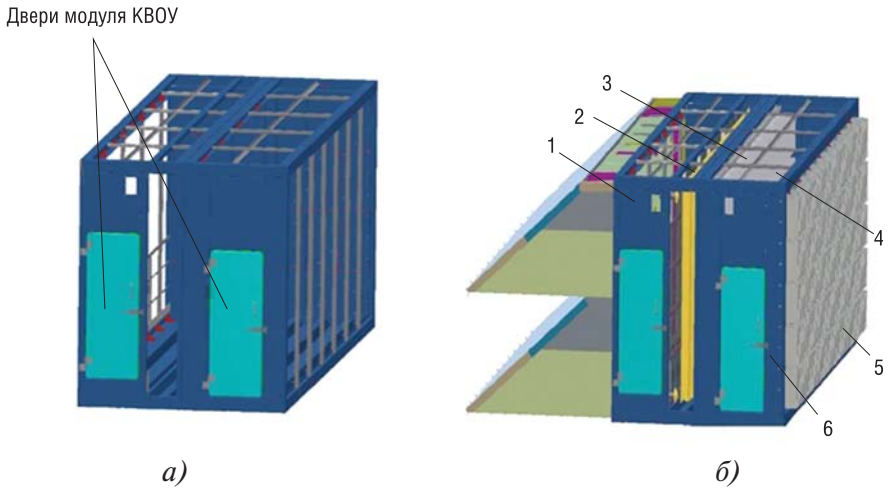
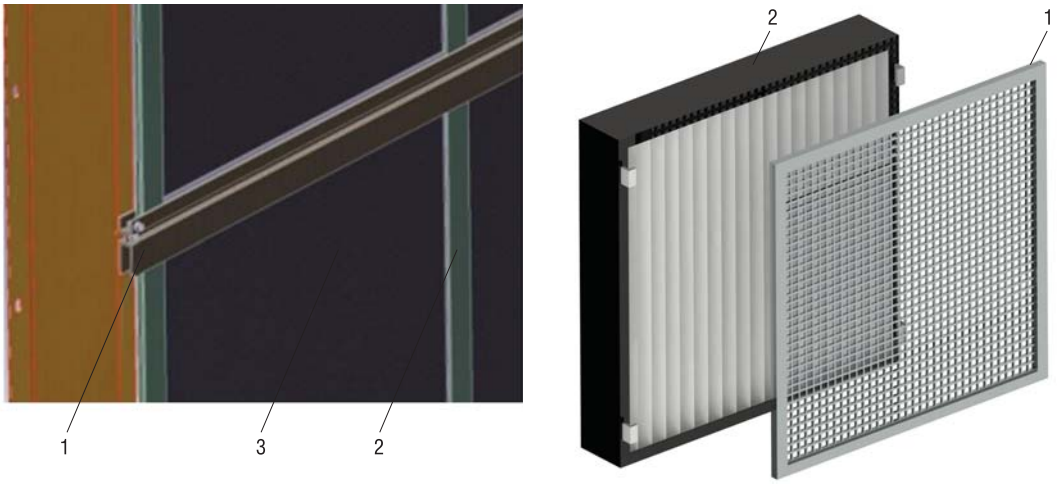


Рис. 3.24. Модули КВОУ ГТУ: а) неоснащенный; б) оснащенный:
1 – секция предподогрева воздуха (трубопроводы);
2 – секция теплообменного аппарата; 3 – секция коагуляторов;
4 – секция предфильтров; 5 – секция ФТО; 6 – секция фильтров

На входе воздуха в модули устанавливаются погодные козырьки, предназначенные для предотвращения попадания атмосферной влаги в виде дождя или снега на воздушные фильтры. АОС должна предотвращать намокание воздушных фильтров и их занос (блокировку) снегом (*рис. 3.24б*). Для предотвращения попадания в системы фильтрации воздуха посторонних предметов на всасе в КВОУ должны устанавливаться защитные сетки от птиц и мусора, а также противомоскитные сетки от двукрылых насекомых и плодов цветения растений.

Противомоскитные сетки

Противомоскитные сетки являются дополнительной фильтрующей ступенью, которая используется для защиты воздушных подогревателей КВОУ от сезонного загрязнения насекомыми или семенами растений.



а) *б)*

Рис. 3.25. Способы крепления противомоскитных сеток:
а) 1 – алюминиевый профиль, 2 – пластиковый Н-образный профиль, 3 – противомоскитная сетка; б) 1 – противомоскитная сетка; 2 – фильтр

При загрязнении противомоскитные сетки могут быть очищены пылесосом. Необходимость в использовании таких сеток возникает только в теплое время года. В холодное время, когда работает система подогрева воздуха, сетку нужно снять.

Есть несколько способов крепления противомоскитных сеток, самыми распространёнными являются крепление специальными фиксаторами и установочными полосами (*рис. 3.25а*) или прижатие сетки непосредственно к фильтру с помощью зажимов (*рис. 3.25б*).

Коагуляторы

Следующей ступенью очистки воздуха являются фильтры-коагуляторы. Коалесцирующие фильтры, или коагуляторы представляют собой специальный фильтровальный элемент, принцип действия которого основан на явлении коалесценции, при котором мелкие капли сливаются в более крупные, и в последующем выводятся из материала под действием силы тяжести. Кроме того, коагуляторы удаляют из воздушного потока ши-

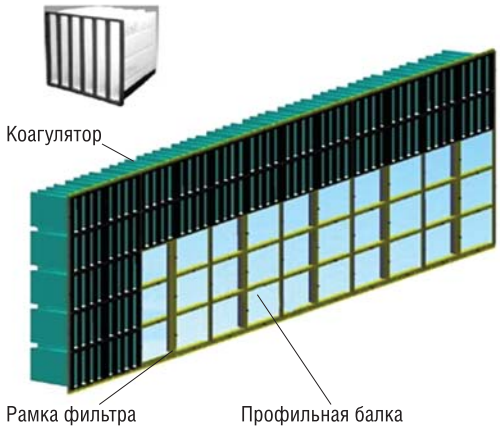


Рис. 3.26. Модуль для установки коагуляторов

рокий спектр водорастворимых загрязнений, тем самым защищая от них ГТУ. Крупные капли отводятся в дренажную систему фильтрующего модуля. Коагуляторы могут очищаться и эксплуатироваться вплоть до истечения срока службы. Способ установки коагуляторов представлен на *рис. 3.26.*

ФГО и ФТО

Фильтрующий модуль также состоит из фильтров грубой (ФГО) и фильтров тонкой (ФТО) очистки.

Фильтр грубой очистки предназначен для очистки воздуха от крупнодисперсных частиц пыли, данные фильтры представлены классами G1–G4 согласно ГОСТ Р ЕН 779-2014. Ступень грубой очистки состоит из короба и самого фильтра (фильтрующего материала).

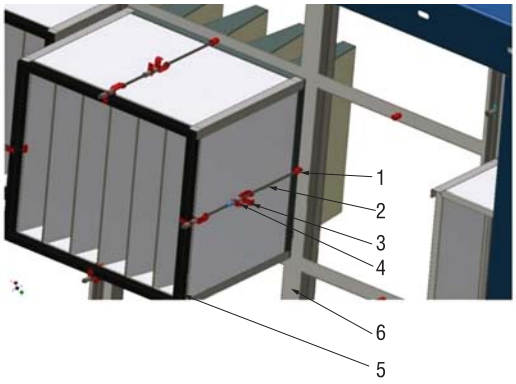


Рис. 3.27. Крепление рамки фильтрующего модуля с элементами ФГО:
1 – накатные гайки; 2 – резьбовой стержень; 3 – крепёжный угол; 4 – крепёжная пластина; 5 – короб; 6 – рамка

Следом за ФГО устанавливаются ФТО (F7–F9), которые удерживают мелкодисперсную пыль. Фильтры тонкой очистки крепятся (вместе с коробом ФГО) с помощью шайб и накатанных гаек. Гибкие прокладки между рамкой модуля и рамкой фильтра обеспечивают необходимую герметичность. Способ крепления ФГО представлен на *рис. 3.27.* ФТО уменьшает количество мелкодисперсной пыли в воздухе. Каждый фильтр состоит из рамки и фильтрующего материала. Элементы ФТО крепятся с помощью шайбовых пластин и накатанных гаек.

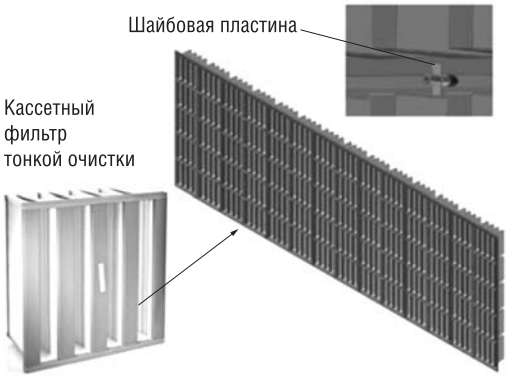


Рис. 3.28. Фильтры тонкой очистки

Упругие прокладки между рамкой модуля и рамкой фильтра обеспечивают необходимую герметичность. Способ крепления ФТО представлен на *рис. 3.28.*

Направляющий короб

Направляющий короб расположен между фильтрующим модулем

и горизонтальным воздуховодом (*рис. 3.19, поз. 6 и рис. 3.21*). Его основной задачей является направление воздуха из фильтрующего модуля в горизонтальный воздуховод в ВЗТ с длинным воздуховодом. В ВЗТ с коротким воздуховодом направляющий короб по сути является переходником, который направляет поток воздуха от фильтрующего модуля к глушителю шума.

Горизонтальный воздуховод

После направляющего короба устанавливается горизонтальный воздуховод, состоящий из нескольких секций (*рис. 3.29*). По нему воздух проходит от направляющего короба к глушителю шума. Внутри горизонтального воздуховода установлены вертикальные и горизонтальные стойки для обеспечения его прочности на расчетное давление воздушного потока.

Рис. 3.29. Секция горизонтального воздуховода

Глушитель шума

В корпус глушителя шума (*рис. 3.30*) и в специальные пластины, разделяющие воздуховод на ряд параллельных каналов, закладываются маты звукопоглощающего материала. Маты закрыты перфорированным листом, прозрачным для акустических волн. Снижение шума происходит за счет диссипации звуковой энергии в поглощающем материале.

Глушитель шума крепится в конце длинного горизонтального воздуховода или сразу за направляющим коробом, если горизонтальный воздуховод короткий. Крепление пластин шумоглушителя показано на *рис. 3.31*. Для более прочного крепления пла-

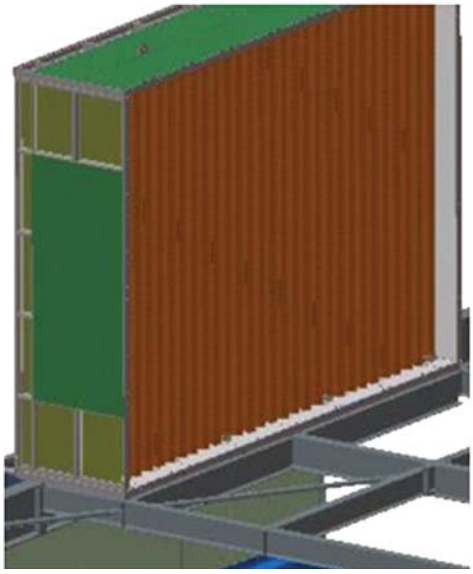


Рис. 3.30. Глушитель шума

Рис. 3.31. Крепление пластин глушителя шума

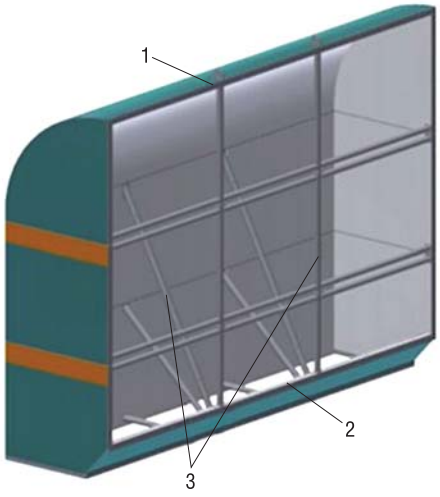


Рис. 3.32. Конструкция углового воздуховода: 1 – угловой воздуховод; 2 – дефлектор; 3 –трубы жесткости

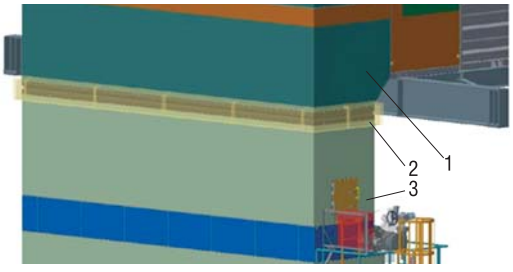


Рис. 3.33. Секция вертикального воздуховода: 1 – угловой воздуховод; 2 – температурный компенсатор; 3 – вертикальный воздуховод

стин шумоглушения их приваривают к основанию конструкции.

Угловой воздуховод

Угловой воздуховод ВЗТ предназначен для поворота воздушного потока и направления его в вертикальный канал. Он крепится болтами к корпусу глушителя шума. Угловой воздуховод состоит из нескольких секций (*рис. 3.32*).

Вертикальный воздуховод соединён с фланцем поворотной камеры через температурный компенсатор (*рис. 3.33*), который снимает напряжения от температурных расширений воздуховода и предотвращает передачу вибрации от ротора ГТУ.

Запорная заслонка

Запорная заслонка (1) представляет собой конструкцию с одной лопастью для ГТУ SGT5-2000E (*рис. 3.34*). Она расположена в вертикальном воздуховоде системы впуска воздуха и согласно инструкции по эксплуатации должна быть открыта перед пуском ГТУ.

На заслонке установлены три концевых выключателя, которые блокируют запуск ГТУ, если два из трех выключателей не указывают на положение «открыто». На заслонке установлен еще один концевой выключатель, указывающий на положение заслонки «закрыто».

Запорная заслонка оснащена системой электропривода, управляющими контактами и датчи-

ками положения для дистанционного мониторинга и управления. Приводы и контрольно-измерительные приборы расположены в локальном отсеке для легкого доступа при осмотре, техническом обслуживании или ремонте. Приводные механизмы запорной заслонки также оснащены отдельной системой ручного управления. Для технического обслуживания заслонку можно зафиксировать вручную в закрытом положении.

Приводы отключаются блоком управления «черного ящика» с помощью соответствующих концевых выключателей. Закрытие заслонки должно быть предусмотрено во время работы ГТУ (макс. 155 об/мин, Δ_p = 5 мбар). Если запорная заслонка во впускном канале открыта более 25 минут во время работы двигателя (режим консервации) ГТУ, на панели управления появляется сообщение о неисправности «Запорная заслонка компрессора не закрыта».

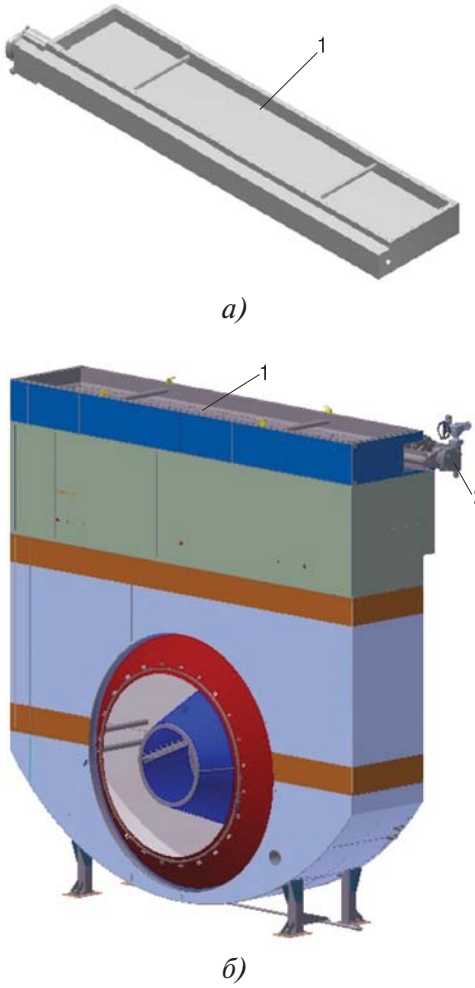
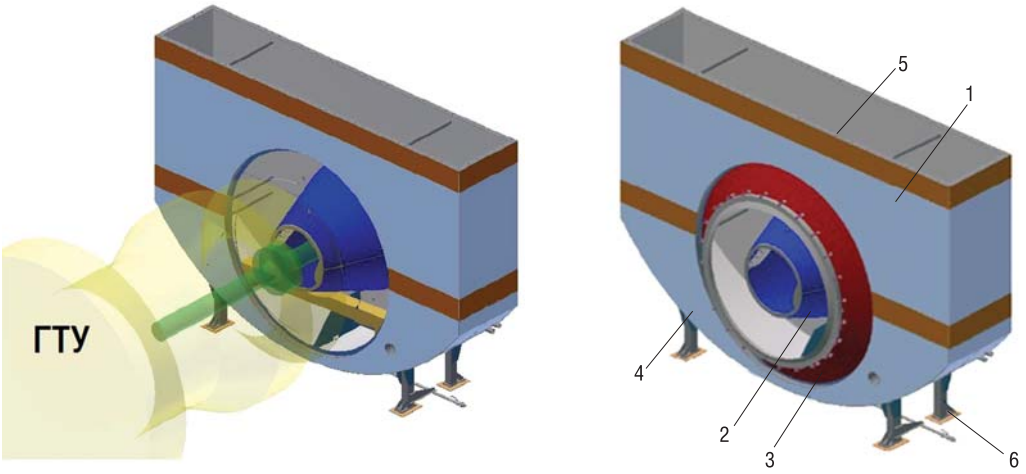


Рис. 3.34. Запорная заслонка: 1 – внешний вид и место установки; 2 – электропривод

Воздуховод подачи воздуха в компрессор ГТУ

Его задача заключается в том, чтобы направлять воздух по назначению без какой-либо турбулентности (*рис. 3.35а*). Воздуховод состоит из нижней и верхней секций забора воздуха, внутреннего впускного конуса, внутреннего раструба и внешнего конуса (*рис. 3.35б*). Наружный конус крепится зажимным устройством и герметизируется специальным уплотнительным профилем к ГТУ. Вал между ГТУ и генератором покрыт защитой (защита вала генератора). Устройство для очистки компрессора, состоящее из распылительных форсунок, соединенных кольцевым каналом, установлено на впускном конусе напротив входа компрессора.



а) *б)*

Рис. 3.35. Выходной воздуховод: а) соединение с ГТУ; б) конструкция: 1 – верхняя часть; 2 – внутренний конус; 3 – внешний конус; 4 – нижняя часть; 5 – раструб; 6 – опоры

Вал генератора оснащён съёмным корпусом для защиты от загрязнений (*рис. 3.36*). Сегменты защитного корпуса крепятся быстросъёмными зажимами, которые закрепляются предохранительными винтами и болтами.

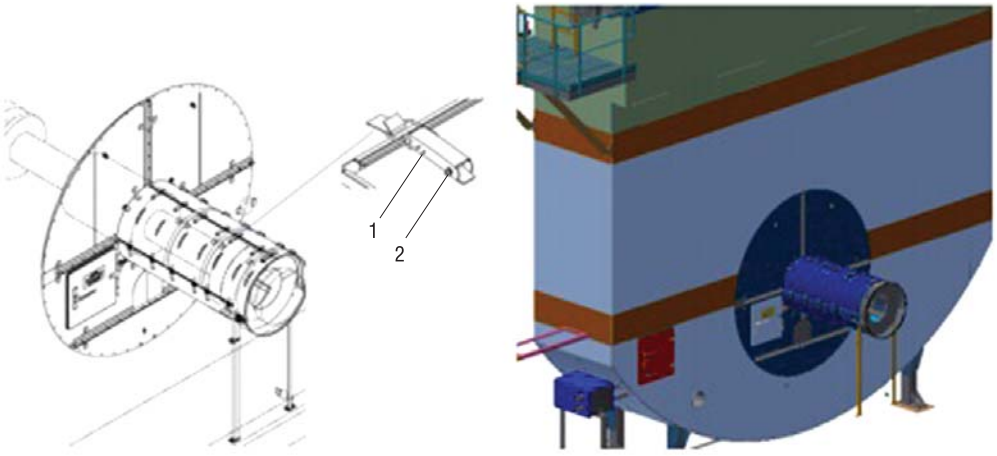


Рис. 3.36. Защита вала генератора: 1 – зажим; 2 – предохранительные винты и болты

Система промывки проточной части ГТУ

Для удаления отложений на лопатках компрессора ГТУ применяется система очистки моющим раствором или химически очищенной водой (ХОВ). Моющий раствор по кольцевому трубопроводу через форсунки поступает в проточную часть ГТУ из бака, где смешиваются ХОВ и моющее средство (*рис. 3.37*).

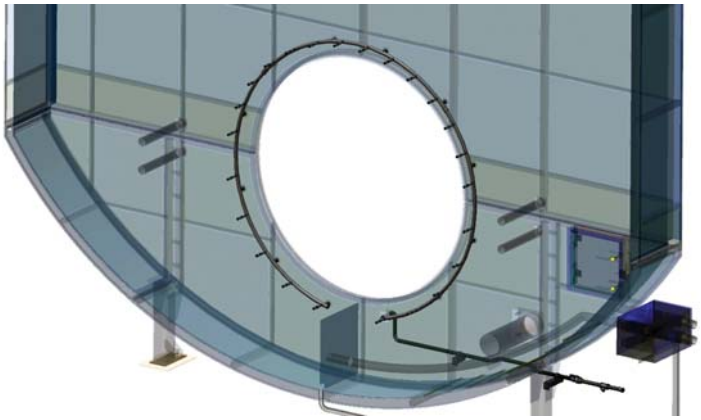


Рис. 3.37. Форсунки и трубопровод системы подачи ХОВ и моющего раствора в ГТУ

Форсунки специальной конструкции обеспечивают всестороннее смачивание лопаток компрессора и эффективную очистку на всех ступенях компрессора ГТУ.

Площадки обслуживания и грузовая лебедка КВОУ

Для обслуживания систем фильтрации воздуха и оборудования на каждом ярусе КВОУ установлены площадки обслуживания и лестницы с ограждениями. Для доставки и снятия воздушных фильтров на верхнем ярусе КВОУ установлена грузовая лебедка грузоподъёмностью 250 кг.

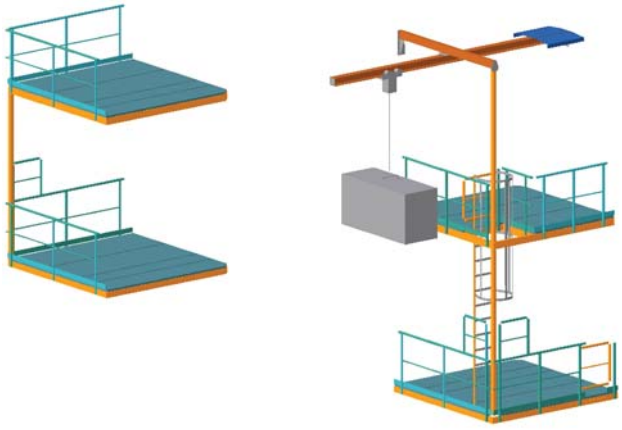


Рис. 3.38. Площадки обслуживания и грузовая лебедка КВОУ

Байпасные клапаны

Более ранние конструкции КВОУ ГТУ оснащены байпасными клапанами, предназначенными для предотвращения от схлопывания воздуховодов ВЗТ (*рис. 3.39*).

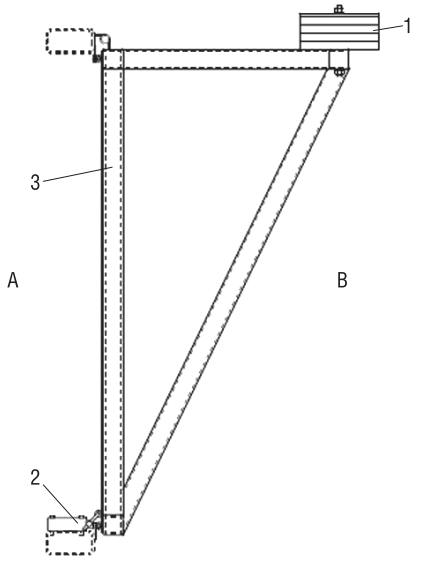


Рис. 3.39. Байпасный клапан:
1 – противовес;
2 – конечный выключатель;
3 – люк. А – зона окружающей среды;
В – зона повышенного давления

В случае внезапного увеличения перепада давления между КВОУ и погодными козырьками, вызванного, например, загрязненными/заблокированными фильтрами, люки байпасных клапанов откроются автоматически, позволяя потоку воздуха беспрепятственно проходить через них в обход системы фильтрации. Это снизит перепад давления, таким образом будет предотвращено механическое повреждение фильтров КВОУ и компрессора ГТУ. Люки байпасных клапанов оборудованы противовесом для удержания их закрытыми при нормальных условиях эксплуатации. Байпасные клапаны срабатывают, когда сила действия перепада давления превышает силу действия противовеса. Когда перепад давления снижается, люки байпасных клапанов закрываются благодаря усилию противовеса.

При срабатывании люка байпасных клапанов замыкается конечный выключатель, который активирует аварийный сигнал на пульте щита управления блока электростанции. Причину аварийного сигнала следует определить как можно быстрее и провести соответствующие технические мероприятия. Люки байпасных клапанов должны быть оснащены защитными сетками от птиц (*рис. 3.40а*). Уплотнение между люками байпасных клапанов и корпусом КВОУ выполнено прокладками, оснащенными термостатически-контролируемыми кабелями обогрева, которые предотвращают замерзание люков (*рис. 3.40б*).

Размещение байпасных клапанов производится на «чистой стороне» КВОУ за фильтрами финишной очистки циклового воздуха ГТУ. Порой производители ВЗТ планируют для размещения в своем КВОУ финишные фильтры строго определенной глубины, например 292 мм. В случае повышенной запыленности атмосферного воздуха на конкретной ТЭЦ целесообразно использовать финишные фильтры повышенной площадью фильтрации и пылеемкости, что влечет за собой рост осевого размера (глубины) фильтр-элементов. Если размещение

байпасных клапанов окажется близко к фильтрам 292 мм, то установка фильтров с большой глубиной в этом месте окажется невозможной (*рис. 3.41а*).

В этом случае приходится устанавливать часть фильтров размером 292 мм в зоне байпасных клапанов и 400–440 мм на остальной части стены фильтров финишной очистки. Естественно, это не лучшим образом отражается на эффективности очистки циклового воздуха ГТУ и выработке электроэнергии. Снаружи КВОУ байпасные клапаны могут быть защищены от атмосферных осадков погодными козырьками (*рис. 3.41б*).

Роллеты, воздушные заслонки

На ряде ВЗТ энергетических ГТУ для предотвращения поступления влажного и загрязненного воздуха в КВОУ и на всас осевого компрессора турбомашины устанавливают роллеты или воздушные заслонки (роллетного типа). Роллеты обычно размещают в КВОУ перед воздушными фильтрами (*рис. 3.42а*). Воздушные заслонки расположены на «чистой стороне» за воздушными фильтрами и байпасными клапанами (*рис. 3.42б*).

Роллеты и воздушные заслонки снабжены конечными выключателями, сигналы от которых поступают на пульт управления ГТУ. Запуск ГТУ при закрытии этих устройств запрещен.

а)

б)

Рис. 3.40. Байпасный клапан:
а) конечные выключатели и защитная сетка от птиц;
б) кабель обогрева уплотнений между люками байпасных клапанов и корпусом КВОУ

а) *б)*

Рис. 3.41. Расположение байпасного клапана:
а) внутри КВОУ рядом с финишными фильтрами; б) погодный козырек снаружи КВОУ

а) *б)*

Рис. 3.42. Устройства, предотвращающие поступление влажного и загрязненного атмосферного воздуха в КВОУ и ГТУ: а) роллеты; б) воздушная заслонка

Метеостанция, освещение, датчики давления

На одной из площадок обслуживания современных КВОУ энергетических ГТУ размещаются метеостанции для контроля параметров окружающей среды – относительной влажности и давления (*рис. 3.43*). Показания этих датчиков выводятся на пульт управления ГТУ электростанции.

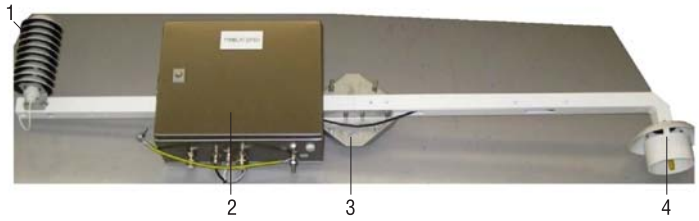


Рис. 3.43. Метеостанция КВОУ ГТУ:1 – радиационный экран для дополнительного температурного зонда; 2 – передатчик; 3 – монтажная пластина для крепления; 4 – радиационный экран для зонда относительной влажности

КВОУ на входе и внутри модулей оснащены светильниками с защитными плафонами (*рис. 3.44*). Для предотвращения проникновения грязного воздуха в КВОУ входные двери в модули имеют уплотнительные прокладки.

а) *б)*

Рис. 3.44. Модуль КВОУ ГТУ, освещение: а) на входе; б) внутри

Перепад давления на фильтрах КВОУ контролируется с помощью датчиков, установленных на каждой ступени очистки воздуха, обычно только на одном ярусе и всасе ВЗТ. Безусловно, этого недостаточно для полноценного контроля (мониторинга) за перепадом давления на фильтрах других ярусов и всасов КВОУ.

Резюме

Выбор конструкции ВЗТ энергетической ГТУ, типа и состава системы фильтрации циклового воздуха, противообледенительной системы осуществляется на основании мониторинга окружающей среды, конкретных условий для макроклиматического района эксплуатации оборудования согласно ГОСТ 15150-69 и руководящего документа «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических ГТУ» РАО «ЕЭС России».

Порой мы видим многое,
но не замечаем главного

Конфуций

Глава 4

МОНИТОРИНГ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА И ВОЗДУШНЫХ ФИЛЬТРОВ КВОУ ГТУ ПАО «МОСЭНЕРГО»

4.1. Цели мониторинга окружающей среды на ТЭЦ с ГТУ

В докладе [1], представленном на технической конференции и экспозиции турбомашиностроения GT 2016 (Материалы выставки «ASME Turbo Expo 2016» в Южной Корее), говорилось, что «*для выбора оптимальной системы фильтрации рекомендуется проводить регулярные измерения качества воздуха на месте с целью определения фактического состава окружающего воздуха и не полагаться на стандартные данные распределения взвешенных частиц*».

Там же отмечалось, что при стандартном распределении частиц образца атмосферной пыли по размерам подавляющее большинство (91,72 %) находится в диапазоне 0,0...0,5 мкм. Тем не менее фактическое распределение частиц по размерам в месте расположения электростанции может существенно отличаться от стандартного. Приводился пример электростанции в Южной Аргентине, где при измерении твёрдых частиц при сильном западном ветре памперо более 60 % имели размеры 1,0...3,0 мкм. Поэтому настоятельно рекомендуется проводить количественные измерения частиц окружающей среды в течение длительного времени, чтобы получить информацию о фактическом распределении частиц по размерам до принятия решения об изменении системы фильтрации.

К климатическим факторам, влияющим на воздушные фильтры КВОУ, относятся температура и влажность окружающей среды, «роза ветров», наличие рек, озер, водоемов, болот, лесного комплекса, полей, двукрылых насекомых, а также природные катаклизмы в виде пожаров, смерчей, ураганов, наводнений, землетрясений. Рукотворными факторами являются результаты деятельности человека, влияющие на загрязнение окружающей среды, а также ошибки при проектировании, изготовлении оборудования из-за неучета климатических условий его

эксплуатации в конкретном регионе, неоптимального расположения оборудования на объектах электроэнергетики, влияющего на эффективность его работы.

Анализ, выполненный в *главе 2*, показал, что климатические и рукотворные факторы окружающей среды в совокупности с «розой ветров» образуют индивидуальный для каждой ТЭЦ фон загрязненности воздуха на всасе в воздухозаборные устройства ГТУ. Поэтому эффективность системы очистки циклового воздуха ГТУ должна определяться сравнением результатов мониторинга атмосферного воздуха перед ВЗТ и за финишной ступенью фильтрации.

В Москве с 2015 года организован постоянный мониторинг загрязненности воздуха на всасах и чистой стороне КВОУ филиалов с ПГУ, позволяющий определить эффективность действующих систем фильтрации циклового воздуха ГТУ [2]. С этой целью были осуществлены следующие организационно-технические мероприятия:

– для определения наиболее пылеопасного направления ветра с помощью системы «Глонасс» выполнена рекогносцировка КВОУ ГТУ на территории электростанций и полученные данные сопоставлены с «розой ветров», предоставленной проектной организацией;

– с учетом «розы ветров» определены рукотворные источники загрязнения воздуха, оказывающие существенное влияние на работу фильтров КВОУ ГТУ;

– из специалистов ТЭЦ с ПГУ сформированы и подготовлены группы для мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на всасах и за фильтрами КВОУ ГТУ;

– для получения объективных результатов замеров и корректного сравнительного анализа загрязненности атмосферного воздуха на КВОУ ГТУ все группы были снабжены одинаковыми по классу счетчиками частиц;

– для оценки эффективности системы фильтрации воздуха на «чистой» стороне КВОУ были изготовлены и установлены устройства взятия анализов циклового воздуха ГТУ;

Целями мониторинга являются:

– создание паспортов атмосферного воздуха на входе в воздухозаборные тракты ГТУ для оптимизации выбора комплектов фильтров КВОУ, определение необходимого класса фильтров, продление их срока службы и повышение эффективности работы ГТУ путем отказа от затратных и малоэффективных промывок их проточной части;

– на основании паспортов атмосферного воздуха провести сравнение ТЭЦ с ПГУ между собой, выработать требования к системам фильтра-

ции ГТУ каждой станции, проанализировать поставщиков фильтров КВОУ для конкретных климатических условий.

Мониторинг окружающей среды и фильтров КВОУ проводился прибором Aero Trak 9306-V2 (США), позволяющим осуществить количественный подсчет взвешенных в атмосферном воздухе частиц от 0,3 до 10 мкм. Нижняя граница отсчета прибора важна, поскольку эффективность (класс очистки) воздушных фильтров во время их тестирования на испытательных стендах определяется для частиц размером 0,4 мкм. Компактность прибора и его быстродействие позволяют брать пробы воздуха и получать результаты анализов на любой высоте в заданной точке в кратчайший срок. Этот прибор используется для мониторинга чистых помещений в соответствии с ГОСТ Р ИСО 14644, научных исследований, тестирования фильтров.

Эффективность системы фильтрации КВОУ ГТУ определялась сравнением результатов замеров на входе в воздухозаборный тракт и на «чистой» стороне воздуха. Скорости потока воздуха в КВОУ ГТУ замерялись переносным анемометром Airflow Instruments Model TA465 (Великобритания).

4.2. Мониторинг влияния слоистости приземного слоя тропосферы на воздушные фильтры КВОУ ГТУ

Атмосфера Земли имеет слоистую структуру, которая является результатом температурных изменений на разных высотах. Атмосфера разделяется на тропосферу, стратосферу, мезосферу, термосферу и экзосферу [3].

Тропосфера – самый 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, колебанием температуры воздуха, влажности, давления. Это обусловлено тем, что Солнце нагревает поверхность почвы, от которой нагреваются нижние слои воздуха. Поэтому температура воздуха с увеличением высоты снижается, что приводит к вертикальному перемещению воздуха, конденсации водяного пара, образованию облаков и выпадению осадков. С поднятием на высоту температура воздуха снижается в среднем на 0,6 °С на каждые 100 м высоты. В зависимости от географической широты местности верхняя граница тропосферы находится в пределах от 7 до 18 км.

Приземный слой воздуха – это нижняя часть тропосферы (или пограничный слой), непосредственно прилегающая к земной поверхности.

В приземном слое, толщина которого от 30 до 50 метров, проявляется механическое и тепловое воздействие земной поверхности на воздушные потоки, в результате чего возникает сильная турбулентность.

Высота установки комплексных воздухоочистительных устройств газотурбинных энергетических установок 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.

Рис. 4.1. Визуализация потоков в пограничном слое тропосферы (https://clck.ru/33VsZD)

На *рис. 4.1* представлены результаты визуализации воздушных течений (скоростей) в приземном слое тропосферы [3]. В результате исследований удалось установить, что не только сама атмосфера имеет слоистую структуру, но и в приграничном слове тропосферы присутствуют эти явления.

Ввиду неоднородности воздушных потоков возникает неравномерное распределение взвешенных частиц в кубометре приземного слоя воздуха.

Для определения изменения загрязненности воздуха в зависимости от точки забора пробы 19.11.2015 на ТЭЦ в центре Москвы (ЗАО) были взяты анализы воздуха на поверхности земли (под КВОУ) и на высоте 2,0 м, 13,0 м, 16,5 м и 20,0 м. Следует отметить, что перед КВОУ установлен забор высотой 3 м, являющийся естественной преградой для потоков воздуха, поступающих извне. Результаты замеров показаны на *рис. 4.2.* Как видно из представленных зависимостей, они имеют аналогичную изогнутую (S-образную) форму. Наибольшее количество взвешенных частиц в обоих случаях зафиксировано у поверхности земли. По мере перемещения точки забора проб вверх отмечается ярко выраженная тенденция снижения количества взвешенных частиц до отметки 13,0 м (нижний ярус КВОУ). В диапазоне 13,0–16,5 м зафиксировано резкое увеличение запыленности воздуха на всасе КВОУ (второй ярус), соизмеримое с величинами, полученными на поверхности земли.

Далее по высоте КВОУ загрязненность воздуха снижается, достигая на отметке 20,0 м значений, близких к результатам на высоте 2,0 м.

На *рис. 4.3* приведены результаты замеров, выполненных на всасе нижнего яруса КВОУ ГТУ на высоте 13,0 м от земли счетчиком частиц Aero Trak 9306-V2. Показания прибора зафиксировали наименьшее количество и наибольшую концентрацию взвешенных частиц в кубометре воздуха по высоте КВОУ ГТУ.

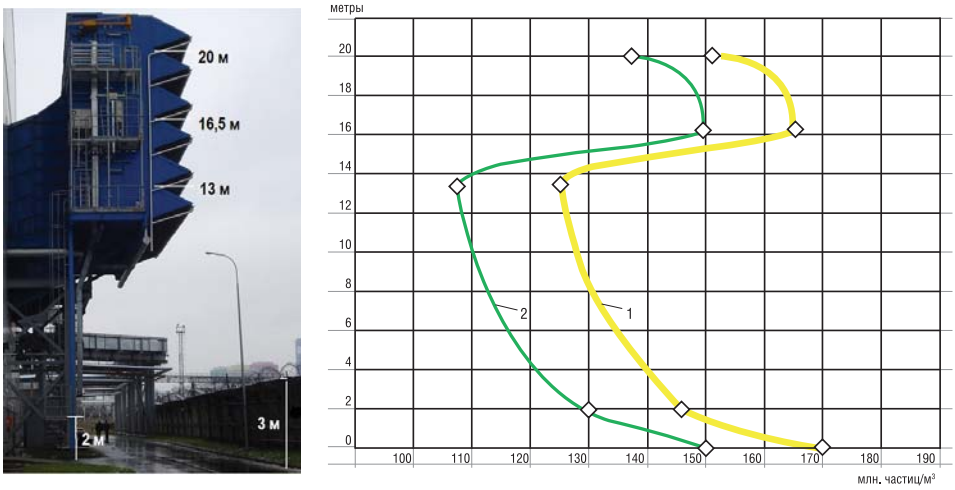
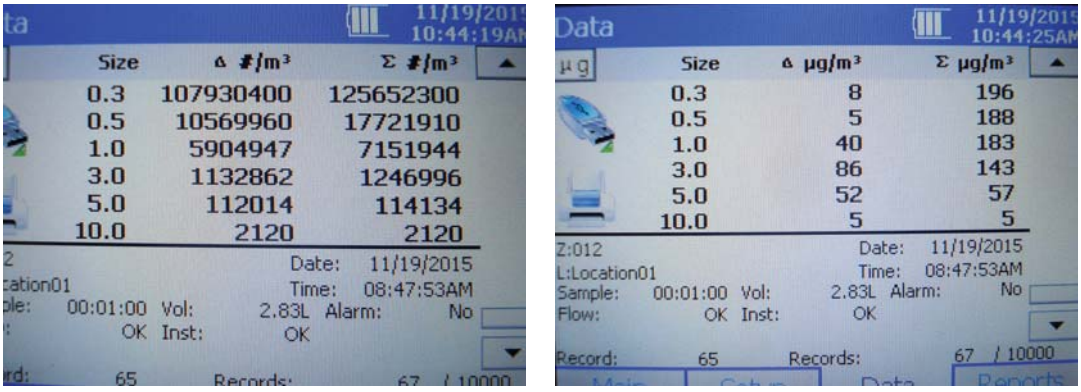


Рис. 4.2. Распределение количества взвешенных частиц в атмосферном воздухе по высоте КВОУ ТЭЦ в ЗАО:
1 – общее количество частиц; 2 – количество частиц размером 0,3–0,5 мкм



а) *б)*

Рис. 4.3. Количество (а) и концентрация (б) взвешенных частиц на всасе первого яруса КВОУ ГТУ

На *рис. 4.4* 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 концентрации зафиксирована на высоте 13,0 м, т. е. на всасе нижнего яруса КВОУ. Таким образом, мы имеем ситуацию, когда наибольшее количество частиц поступало на второй ярус, а максимальная концентрация была отмечена на нижнем ярусе КВОУ. В то же время на отметке 16,5 м концентрация взвешенных частиц соизмерима с величиной на высоте 2,0 м от уровня земли.

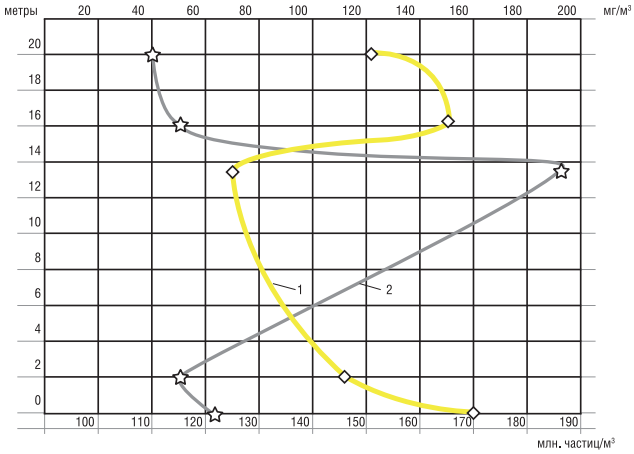


Рис. 4.4. Распределение количества взвешенных частиц в атмосферном воздухе по высоте КВОУ ТЭЦ в ЗАО: 1 – общее количество частиц; 2 – концентрация взвешенных частиц в кубометре атмосферного воздуха по высоте КВОУ (19.11.2015)

Определим пылевую нагрузку на фильтры трех ярусов КВОУ на номинальном режиме работы ГТУ, при котором расход воздуха через компрессор составляет 428 м³/с (*табл. 4.1*).

Результаты расчета пылевой нагрузки на фильтры КВОУ ***Таблица 4.1***

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 нижнего яруса будет в 3,8–5,0 раз меньше, чем фильтров 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 блокированные пылью фильтры на определенном ярусе. Это позволит значительно сократить сроки и снизить трудозатраты, а также финансовые издержки из-за необоснованного расходования фильтров.

На *рис. 4.5* представлены результаты замеров, выполненных на той же ТЭЦ в ЗАО 29.03.2016. 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. 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, наибольшее значение также зафиксировано на втором ярусе. Отличием в весенний период 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.

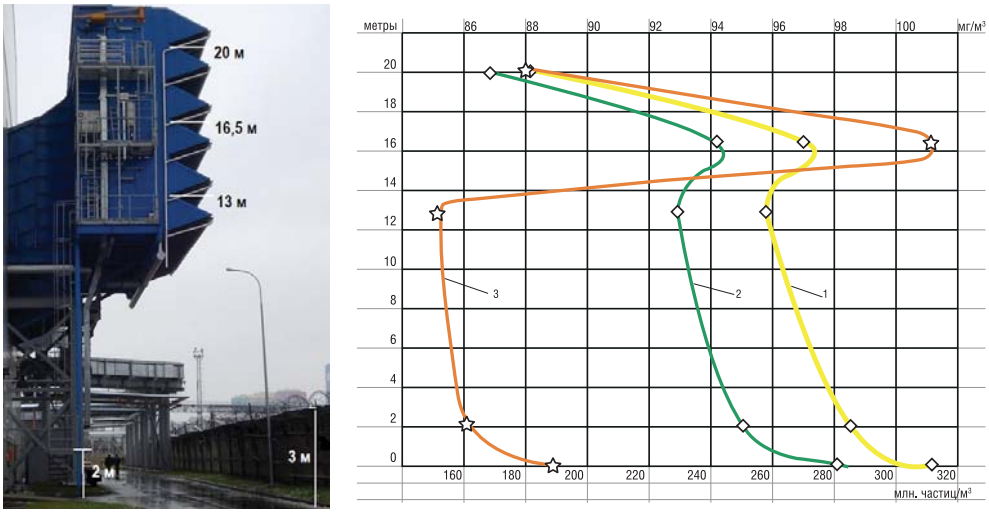
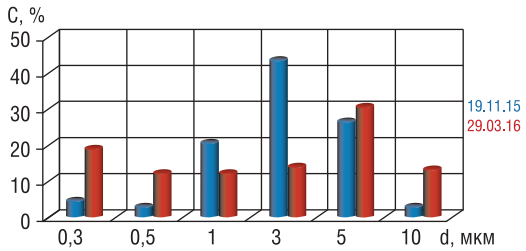
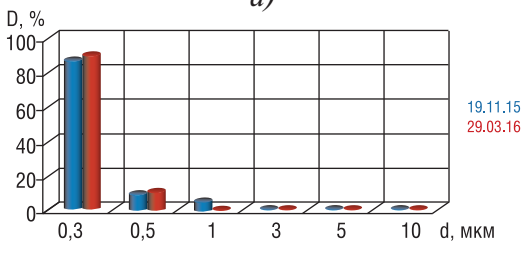


Рис. 4.5. Распределение количества и концентрации взвешенных частиц в кубометре атмосферного воздуха по высоте КВОУ (29.03.2016): 1 – суммарное количество взвешенных частиц; 2 – количество мелкодисперсных частиц (0,3 мкм); 3 – суммарная концентрация взвешенных частиц

Попробуем объяснить это отличие, сравнив дисперсный состав взвешенных частиц в слоях воздуха с наибольшей концентрацией на всасе КВОУ в обоих случаях. На *рис. 4.6* представлено процентное распределение количества и концентрации взвешенных частиц в кубометре воздуха 19.11.2015 и 29.03.2016.



а)



б)

Рис. 4.6. Распределение концентрации C (а) и дисперсности D (б) взвешенных частиц в атмосферном воздухе на ТЭЦ в ЗАО в воздушном слое наибольшей концентрации

Из представленной гистограммы (*рис. 4.6а*) видно, что количество мелкодисперсных частиц 0,3 мкм в 2016 году больше, чем в 2015-м на 4 %. При этом в 2015 году частиц размером 1,0 мкм на 4 % больше, чем в 2016-м. Другими словами, имеет место перераспределение по дисперсности процентного содержания взвешенных частиц в атмосферном воздухе. Количество взвешенных частиц размером 3,0 мкм осенью 2015 года не достигало 1 %, зато процентное содержание концентрации этих частиц превысило 43 %, что в 6,2 раза больше, чем в 2016 году (*рис. 4.6б*). Концентрация частиц размеров 1,0 и 5,0 мкм также была высокой, 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. Иначе говоря, 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, не способных 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 воздуха была зафиксирована 8 сентября 2016 года при мониторинге загрязненности воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ-2 в Южном административном округе (ЮАО). На *рис. 4.7* [3] 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 большим количеством (млн частиц /м^3) и концентрацией (мг/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 верху слоях воздуха. Общее количество взвешенных частиц, поступающих на второй и третий ярус КВОУ, более чем в 7,5 раз превышает этот параметр на нижнем и верхних ярусах; концентрация – в 1,5–2 раза.

Для качественной оценки влияния различных слоев воздуха на работу воздушных фильтров КВОУ необходимо выполнить сравнительный анализ дисперсного состава взвешенных частиц в этих потоках. На *рис. 4.8* представлено процентное распределение количества и концентрации взвешенных частиц по дисперсности в нижнем и среднем слоях воздуха, поступающего в КВОУ ГТУ ТЭЦ-2 в ЮАО.

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 ко-

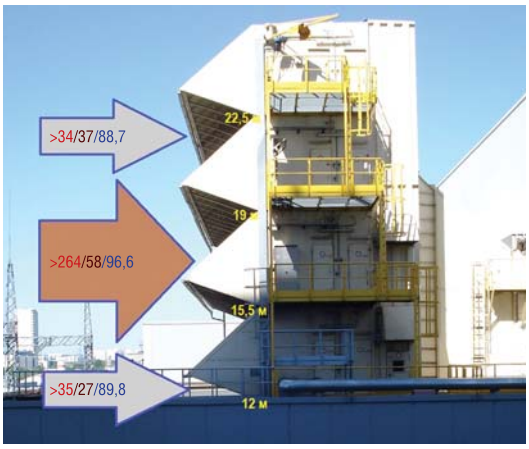
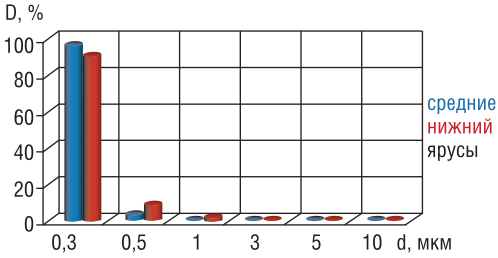
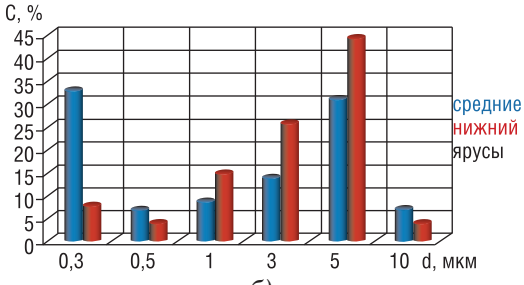


Рис. 4.7. Распределение слоев воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ-2 в ЮАО: первое число – суммарное количество взвешенных частиц; второе – суммарная концентрация взвешенных частиц; третье – процентное содержание мелкодисперсных частиц 0,3 мкм в кубометре воздуха



а)



б)

Рис. 4.8. Дисперсность D (а) и распределение концентрации C (б) взвешенных частиц в атмосферном воздухе на нижнем и средних ярусах КВОУ ГТУ ТЭЦ-2 в ЮАО

личества 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. 4.8б*). При этом процентное содержание мелкодисперсных частиц размером 0,3 мкм достигло 96,6 %. Очевидно, что именно эти частицы будут оказывать основное влияние на работу фильтров КВОУ.

На первых ступенях КВОУ обычно устанавливаются коагуляторы и фильтры грубой очистки с классом эффективности G4 по 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. 4.8б*). 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 истинной картины загрязнения фильтров по высоте воздухозаборного тракта.

Многолетние исследования, выполненные нами, показали:

– целесообразность мониторинга окружающей среды на площадке будущего строительства ПГУ еще на этапе подготовки технического задания с целью предотвращения ошибок проектирования, связанных с размещением КВОУ ГТУ относительно «розы ветров», неучетом природных и рукотворных источников загрязнения, а также необходимостью определения дисперсности взвешенных в воздухе частиц и их концентрации для правильного выбора системы фильтрации воздуха энергетических ГТУ;

– в результате слоистости воздушных потоков с различными характеристиками запыленности воздушные фильтры работают с неодинаковой по высоте КВОУ пылевой нагрузкой;

– срок службы воздушных фильтров меняется по высоте КВОУ в зависимости от уровня загрязненности слоев атмосферного воздуха;

– датчики перепадов давления, установленные в КВОУ, не отражают истинной картины загрязнения фильтров по высоте воздухозаборного тракта;

– для постоянного и корректного мониторинга состояния воздушных фильтров в процессе эксплуатации необходима модернизация воздухозаборных трактов ГТУ с установкой на каждом всасе и ярусе дополнительных датчиков давления с выводом цифровой информации на блочный щит управления ПГУ ТЭЦ, а также на местный щит, размещенный на КВОУ.

4.3. Влияние лесных пожаров 2010 года на работу фильтров КВОУ ГТУ

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

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

Причиной аномально высокой температуры воздуха, установившейся на столь длительный срок, явился так называемый «блокирующий» антициклон – обширный малоподвижный, длительно существующий антициклон, который не пропускал другие воздушные массы на занимаемую им территорию. Необычно длительный срок существования этого антициклона (более двух месяцев), а также преобладание юго-восточного ветра привели к длительному разогреву воздуха до рекордных температур, особенно в Европейской части территории России. Метеостанция «Балчуг» в Москве зафиксировала 29 июля максимальную температуру атмосферного воздуха +39 °С. Продолжительный период аномально жаркой погоды 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 столице сложилась чрезвычайная экологическая ситуация – наблюдался сильнейший смог, разовые концентрации загрязняющих веществ превышали предельно допустимые концентрации (ПДК) в несколько раз: по угарному газу – почти до 7 раз, по взвешенным веществам – до 16 раз, по диоксиду азота – более чем в 2 раза [4–7].

Управление ЗАГС Москвы 10 августа 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 аэропортов, было запрещено движение судов по каналу имени Москвы, возникли проблемы в работе оборудования ТЭЦ.

В *табл. 4.2* приведены результаты замеров 10 и 12 августа 2010 г. на Звездном бульваре в Останкинском районе Москвы [8].

Количество взвешенных частиц в атмосферном воздухе в Москве в августе 2010 г ***Таблица 4.2***

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	5 633 916	1 526 576
3,0–5,0	503 097	185 976
5,0–10,0	163 753	56 417
Более 10,0	18 307	7794
Всего	875 201 813	283 373 885

Анализ данных, приведенных в *табл. 4.2*, 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/м^3). Содержание этих частиц составляло 84,8 и 88,0 % соответственно.

На *рис. 4.9* представлена фотография смога в Москве днем 3 августа 2010 г. в районе ТЭЦ в ЗАО на Бережковской набережной [8].

На ТЭЦ в ЗАО и ТЭЦ в Московской области (МО) 7 августа 2010 г. резко вырос перепад давления на фильтрах КВОУ ГТУ из-за большого количества частиц, содержащихся в атмосферном воздухе. Скорость загрязнения фильтров была такой высокой, что предельные перепады давления на фильтрах КВОУ достигались в течение нескольких часов работы ГТУ (*рис. 4.10*) [8].

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

На ТЭС «Международная» в связи с высокой запыленностью атмосферного воздуха и резким ростом перепадов давления на фильтрах КВОУ пришлось принудительно останавливать ГТУ Siemens SGT-800

Рис. 4.9. Смог на Бережковской набережной, Москва, 3 августа 2010 г (https://clck.ru/33W4ZU)

(две из четырех) для замены фильтров, остальные двигатели были переведены на пониженные режимы работы. В результате был значительно снижен диспетчерский график электрической нагрузки. Кроме того, остро встал вопрос наличия запасных комплектов фильтров для КВОУ, поскольку замена фильтров была произведена несколько раз.

Смог окончательно покинул Москву только 18 августа.

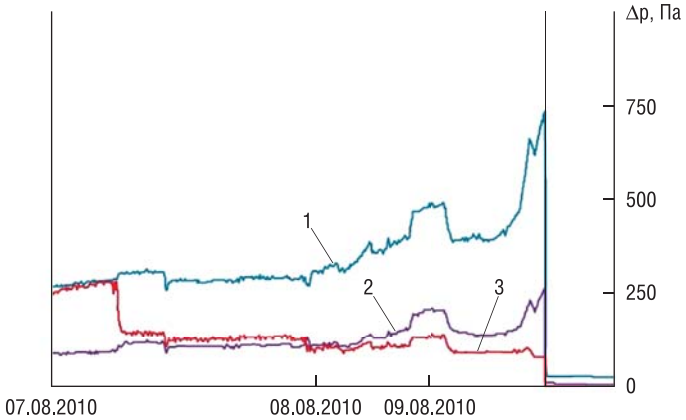


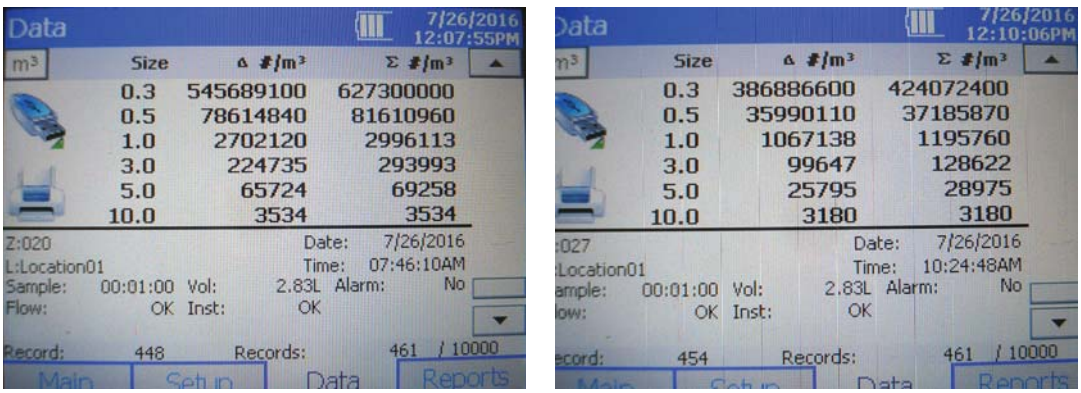
Рис. 4.10. Тренды перепадов давления на фильтрах КВОУ ГТУ 7 августа 2010 г.: 1 – фильтры тонкой очистки; 2 – фильтры грубой очистки; 3 – коагуляторы

4.4. Мониторинг влияния красноярских пожаров в июле 2016 года на работу КВОУ ГТУ ПАО «Мосэнерго»

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 атмосферы. Для снижения антропогенной нагрузки был введен режим неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) первой степени опасности. При объявлении режима «черного неба» промышленные предприятия должны обеспечивать снижение выбросов вредных веществ в атмосферный воздух в соответствии с объявленным режимом НМУ.

Мгла накрыла небо над Москвой 26 июля. По телевизионному сообщению главы Гидрометцентра, взвешенные частицы от лесных пожаров в Красноярском крае достигли пределов Москвы и Московской области (отметим, что расстояние между Красноярском и Москвой – 3352 км по прямой). В отличие от торфяных и лесных пожаров в Московской области 2010 года, этот смог не сопровождался запахом гари, поэтому остался незамеченным большинством москвичей. Однако на объектах ПАО «Мосэнерго» он оставил заметный след [8]. 26 июля на ТЭЦ в ЮЗАО и ТЭЦ в МО в результате замеров были зафиксированы повышенные концентрации взвешенных частиц на всасах КВОУ (*рис.4.11*).



а) *б)*

Рис. 4.11. Количество взвешенных частиц в кубометре атмосферного воздуха 26.07.2016 года на всасе КВОУ ТЭЦ: а – ЮЗАО; б – ТЭЦ в МО

Расстояние между ТЭЦ ЮЗАО и ТЭЦ в Московской области 26 км по прямой. Эта незначительная разница в местонахождении ТЭЦ оказала существенное влияние на загрязненность атмосферного воздуха в этих местах. Общее количество взвешенных частиц в атмосферном воздухе на всасе КВОУ ТЭЦ в ЮЗАО оказалось на 203 млн/м^3 больше, чем на ТЭЦ в МО. Исходя из этого, можно сделать заключение, что Московская область в меньшей степени подверглась загрязнению, чем Москва.

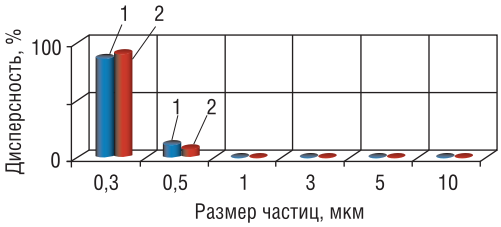


Рис. 4.12. Распределение дисперсности взвешенных частиц атмосферного воздуха на всасе КВОУ ТЭЦ 26 июля 2016 года в: 1 – ЮЗАО; 2 – ТЭЦ в МО

Распределение дисперсности взвешенных частиц в атмосферном воздухе на всасах КВОУ этих ТЭЦ представлены на *рис. 4.12* [8].

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 на ТЭЦ в ЮЗАО на 4 % превышает их количество на ТЭЦ в МО. Иначе говоря, в атмосферном воздухе двух ТЭЦ произошло перераспределение количества взвешенных частиц между их размерами.

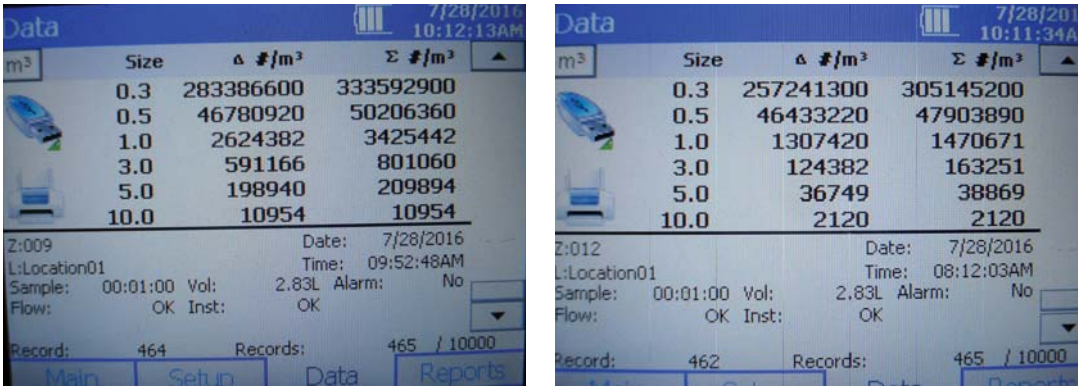
Сравнивая эти данные со значениями, представленными в *табл. 4.2*, приходим к заключению, что дисперсность частиц в атмосферном воздухе ТЭЦ в ЮЗАО в июле 2016 г. практически полностью совпадает с результатами замеров 12 августа 2010 г.

С 26 по 29 июля 2016 года общий перепад давления на КВОУ ТЭЦ в ЮЗАО в Москве увеличился на 50 Па, на ТЭЦ в Подмосковье – на 45 Па. Как известно, увеличение перепада давления в КВОУ на 50 Па приводит к снижению выработки электроэнергии ГТУ в среднем на 0,1 %. Согласно ГОСТ Р ЕН 779:2014, предельно допустимый перепад давления на фильтрах грубой очистки составляет 250 Па (такие фильтры обычно устанавливают на первые ступени системы фильтрации КВОУ).

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

пенно снижая уровень загрязнения атмосферного воздуха. 28 июля на московских ТЭЦ-1 в ЮАО (ул. Автозаводская) и ТЭЦ в ЗАО была зафиксирована концентрация взвешенных частиц вдвое меньше, чем двумя днями ранее на ТЭЦ в ЮАО (*рис. 4.13*) [8]. Расстояние между ТЭЦ-1 в ЮАО и ТЭЦ в ЗАО по прямой (по воздуху) всего 7 км, поэтому разница в общем количестве взвешенных частиц в атмосферном воздухе ТЭЦ не отличалась более чем на 8,5 %.



а) *б)*

Рис. 4.13. Количество взвешенных частиц в кубометре атмосферного воздуха на всасе КВОУ ТЭЦ-1 в ЮАО (а), ТЭЦ в ЗАО (б)

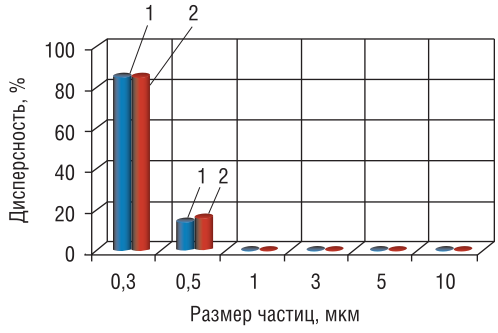


Рис. 4.14. Распределение дисперсности взвешенных частиц атмосферного воздуха на всасе КВОУ ТЭЦ-1 в ЮАО (1) и ТЭЦ в ЗАО (2) 28 июля 2016 года

На *рис. 4.14* представлено распределение дисперсности взвешенных частиц в атмосферном воздухе этих ТЭЦ [8].

Очевидна практически полная идентичность дисперсности взвешенных частиц в атмосфере обеих ТЭЦ. Сравнивая эти данные со значениями в *табл. 4.2*, приходим к выводу, что дисперсность частиц в атмосферном воздухе ТЭЦ-1 в ЮАО и ТЭЦ в ЗАО 28 июля 2016 года практически полностью совпадает с результатами замеров 10 августа 2010 года.

Во время нахождения над Москвой смога от пожаров в Красноярском крае были выполнены замеры на всех ТЭЦ с ПГУ, находящихся в действии. На *рис. 4.15* приведены графики количества взвешенных частиц в атмосферном воздухе, зафиксированные на всасах КВОУ ГТУ 26–29 июля

в сравнении со среднемесячными значениями июня и августа [8].

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 это время над среднемесячными значениями в июне и августе 2016 года представлено в *табл. 4.3.*

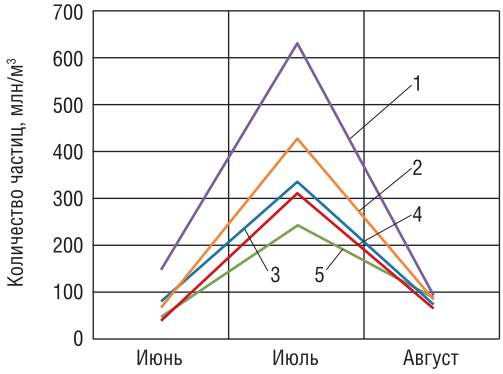


Рис. 4.15. Количество взвешенных частиц на всасах КВОУ ТЭЦ: 1 – ТЭЦ в ЮЗАО; 2 – ТЭЦ в МО; 3 – ТЭЦ-1 в ЮАО; 4 – ТЭЦ в ЗАО; 5 – ТЭЦ в СЗАО

Превышение концентрации взвешенных частиц в кубометре атмосферного воздуха 26–29 июля 2016 г. над средними значениями в июне и августе ***Таблица 4.3***

Место ТЭЦ	Превышение, раз	
	Июнь	Август
ЮАО ТЭЦ-1	4,2	4,4
ЗАО	8,5	4,8
СЗАО	5,6	2,7
ЮЗАО	4,2	7,2
МО	6,5	5,1

На *рис. 4.16* приведены графики распределения мелкодисперсных (0,3–0,5 мкм) взвешенных частиц в атмосферном воздухе, зафиксированные на всасах КВОУ ГТУ 26–29 июля, в сравнении со среднемесячными значениями июня и августа. В отличие от зависимостей, приведенных на *рис. 4.15*, в данном случае имеем минимум функции двух переменных в июле. Наибольшее содержание мелкодисперсных частиц зафиксировано на ТЭЦ в МО, наименьшее – на ТЭЦ в ЗАО [8].

Графические зависимости, представленные на *рис. 4.15* и *4.16*, имеют зеркальное отражение. Таким

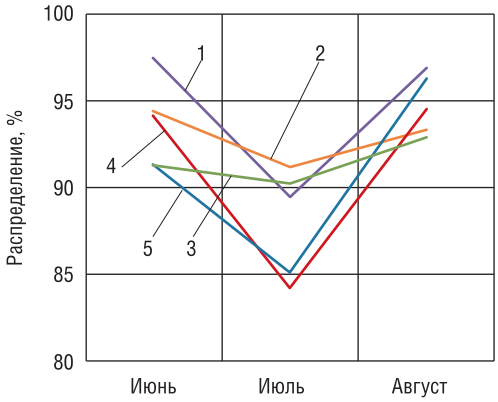


Рис. 4.16. Сравнение ТЭЦ с ГТУ по распределению мелкодисперсных частиц (0,3–0,5 мкм) в кубометре атмосферного воздуха на всасах КВОУ: 1 – ТЭЦ в ЮЗАО; 2 – ТЭЦ в МО; 3 – ТЭЦ в СЗАО; 4 – ТЭЦ ЗАО; 5 – ТЭЦ-1 в ЮАО

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:

– вне зависимости от расстояния очагов пожаров до ГТУ загрязнение воздуха, вызванное этими природными явлениями, оказывает существенное влияние на технические и экономические показатели работы электростанций;

– несмотря на различие в количестве взвешенных частиц в атмосферном воздухе во время пожаров 2010 и 2016 годов, их дисперсный состав полностью идентичен;

– выявлена обратная зависимость между количеством взвешенных частиц и содержанием их мелкодисперсного состава в кубометре атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ.

4.5. Рейтинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ

Из многочисленных трактовок толковых словарей понятия «рейтинг» для наших целей подходит формулировка, приведенная на Web-site Wikipedia Foundation: *«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 мониторинга загрязненности воздуха на всасе КВОУ энергетических ГТУ достигнуты в Москве, где в течение нескольких лет ведется такая работа. На базе исследований строятся рейтинги загрязненности атмосферного воздуха на действующих ТЭЦ с ПГУ [9].

4.5.1. О целесообразности выполнения замеров на всех ТЭЦ в одно и то же время

Результаты одновременных замеров на ТЭЦ-1 в ЮАО, ТЭЦ в СЗАО и ЮЗАО через равные промежутки времени показывают, что максимальные величины количества частиц в кубометре атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ варьируются как внутри филиала, так от филиала к филиалу в течение рабочего дня (*табл. 4.4*).

Результаты мониторинга максимальных значений загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ (млн/м³) ***Таблица 4.4***

ТЭЦ	09:00	13:00	17:00
ЮАО ТЭЦ-1	**182**	74	**154**
СЗАО	121	**171**	68
ЮЗАО	30	51	48

Это обусловлено внешними и внутренними факторами, влияющими на формирование фона окружающей среды: изменением интенсивности движения транспорта по оживленным автомобильным и железнодорожным дорогам, ростом выбросов собственного оборудования ТЭЦ с увеличением нагрузки и др. Так, источниками, формирующими фон окружающей среды перечисленных объектов, являются: Третье транспортное кольцо Москвы с интенсивным автомобильным движением, расположенное рядом с ТЭЦ в ЮАО и недалеко от ТЭЦ в ЮЗАО; железнодорожное движение по Московской кольцевой дороге, а также башенная и вентиляторная градирни, установленные напротив КВОУ ГТУ ТЭЦ в 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.

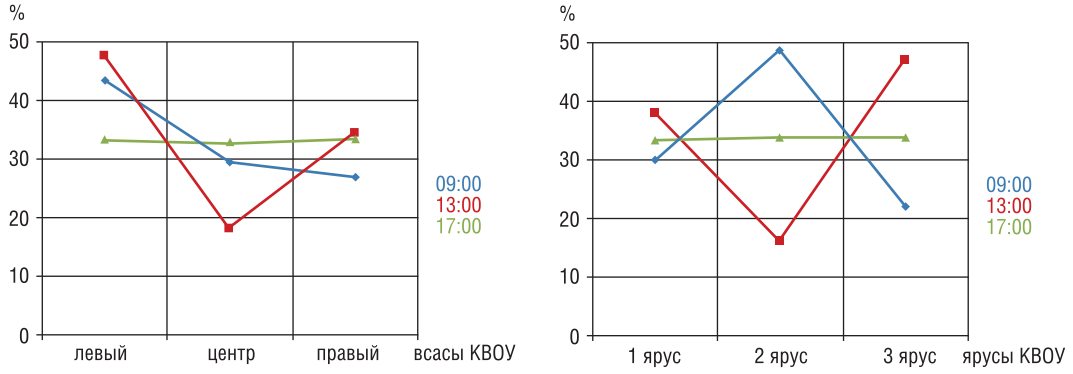
Как показывает практика, в обычных климатических условиях нет прямой пропорциональной зависимости между уровнем загрязненности атмосферного воздуха и расстоянием между ТЭЦ. Так, дистанция между ТЭЦ-1 в ЮАО и ТЭЦ ЮЗАО по прямой составляет всего 5 км, а между ТЭЦ-1 в ЮАО и ТЭЦ в СЗАО – 13 км. При этом уровень загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ в ЮАО в утренние и вечерние часы превышает этот параметр на ТЭЦ в ЮЗАО в несколько раз (*табл. 4.4*).

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, превалирующим над местными источниками фактором задымления с высоким содержанием частиц в кубометре атмосферного воздуха.

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 различное время одного дня.

Для примера на *рис. 4.17* в относительном виде приведены результаты замеров, выполненных на КВОУ ТЭЦ в СЗАО 26.10.2018. Замеры выполнялись через равные промежутки времени (4 часа). Приведенные графические зависимости показывают, что в течение рабочего дня картина распределения максимальных значений загрязнений на всасе и по ярусам КВОУ существенно меняется. Если в утренние и дневные часы работы оборудования ТЭЦ с высокой электрической нагрузкой (при интенсивном транспортном движении с повышенным выбросом выхлопных газов в атмосферу на рядом проходящих автомобильной и железнодорожной трассе) значения загрязненности воздуха велики, то в конце рабочего дня (при снижении интенсивности перечисленных факторов) уровень загрязненности снижается. Происходит выравнивание (равномерное распределение) максимального суммарного количества частиц в кубометре атмосферного воздуха как по всасам, так и по ярусам КВОУ[9].



а) *б)*

Рис. 4.17. Процентное распределение максимального количества частиц в кубометре атмосферного воздуха на ТЭЦ СЗАО: а) по всасам КВОУ; б) 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. 4.17а*).

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 в середине дня, чем в другое время (*рис. 4.17а, б*). Наибольшему воздействию загрязняющих веществ в этот

временной интервал подвергаются воздушные фильтры, установленные на левом всасе третьего яруса КВОУ.

В утренние часы, наоборот, зафиксирован рост загрязняющих веществ на левом всасе второго яруса КВОУ (максимальный экстремум на *рис. 4.17б*). Таким образом, в этот промежуток времени происходит трансформация направлений течения воздушных потоков, приносящих максимальное количество частиц в кубометре атмосферного воздуха.

4.5.2. Методика определения рейтинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ

На каждой ТЭЦ ежедневно в определенное время осуществляется мониторинг загрязненности атмосферного воздуха на всех всасах и ярусах воздухозаборного тракта ГТУ. Для этой цели на все филиалы с ГТУ закуплены и поставлены одинаковые счетчики частиц. Наличие одинаковых приборов (одного класса) является важным фактором, обуславливающим одинаковую точность измерений. Благодаря этому возможен корректный сравнительный анализ результатов измерений, выполненных на всех филиалах общества.

Из специалистов ТЭЦ с ПГУ сформирована и подготовлена группа, осуществляющая мониторинг загрязненности атмосферного воздуха на всасах КВОУ ГТУ. Результаты замеров фиксируются и заносятся в специально разработанные таблицы. По результатам измерений определяется максимальное суммарное количество частиц в кубометре атмосферного воздуха. Ежедневно результаты мониторинга загрязненности со всех филиалов поступают в генеральную дирекцию для анализа фона окружающей среды и принятия необходимых мер в случае экстремальных ситуаций [9].

По мере сбора статистики в каждом филиале с ГТУ строятся графики ежемесячного изменения загрязненности. Фиксируются максимальные суммарные значения количества частиц в кубометре атмосферного воздуха на всех всасах и ярусах. Определяется наибольшее значение из всех измеренных величин, которое используется при построении графика. Аналогичным образом, исходя из поставленной цели, могут строиться графики изменения загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными частицами.

Целью исследований является определение максимального количества частиц в кубометре атмосферного воздуха на всасах КВОУ ГТУ для построения рейтинга загрязненности всех ТЭЦ с ПГУ. 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.

На *рис. 4.18* для примера представлены результаты мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ-1 в ЮАО за июнь 2020 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 июня обусловлен ростом температуры окружающей среды, появлением тополиного пуха и, как следствие, увеличением количества частиц пыли и плодов цветения растений в атмосферном воздухе. Методом аппроксимации результатов мониторинга строятся ежемесячные тренды изменения загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ всех филиалов с ПГУ. 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. 4.18*). На основании ежедневно представляемых филиалами данных создается единая для всех ТЭЦ таблица максимальных значений количества частиц в кубометре атмосферного воздуха на всасах КВОУ ГТУ на текущий месяц [9].

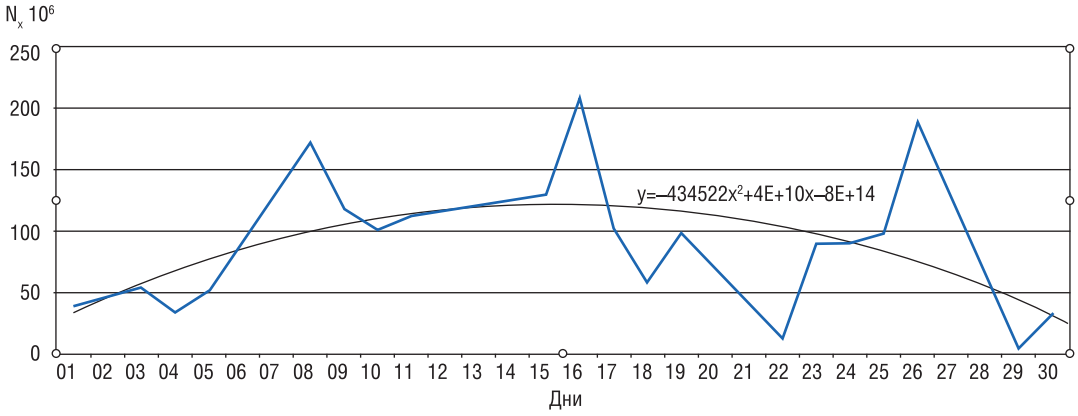


Рис. 4.18. Максимальное количество частиц в кубическом метре атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ-1 в ЮАО в июне 2020 года

В *табл. 4.5* представлены результаты замеров, выполненные на ТЭЦ с ГТУ в июле 2020 года. В течение всего времени мониторинга ГТУ находились в рабочем состоянии. По горизонтали приведены результаты замеров на каждой ТЭЦ ежедневно в течение недели (черный цвет). По вертикали голубым цветом указаны ежедневные места каждой ТЭЦ в рейтинге загрязненности воздуха на всасе КВОУ ГТУ.

Результаты замеров загрязненности воздуха на ТЭЦ в июле 2020 г ***Таблица 4.5***

ТЭЦ	неделя 27					Е	неделя 28					Е	неделя 29					Е	неделя 30					Е	неделя 31						Месяц	
			1	2	3		6	7	8	9	10		13	14	15	16	17		20	21	22	23	24		27	28	29	30	31		ЕЕ	М
ЮАО ТЭЦ1			50	57	61	5	96	170	327	49	27	1	106	164	53	22	26	1	91	186	66	39	40	1	136	451	89	140	31	1	9	1
			5	6	3	14	1	1	1	2	5	10	4	1	2	4	5	16	2	1	2	2	3	10	1	1	3	1	3	9	59	
ЗАО			46	59	34	6	43	58	73	13	16	7	120	156	22	85	16	4	41	58	41	49	42	4	39	26	47	45	17	6	27	7
			6	4	7	17	4	5	7	6	6	28	2	2	7	1	7	19	6	5	7	1	2	21	6	6	6	4	6	28	112	
СЗАО			60	111	54	2	46	75	102	48	60	2	47	56	31	20	33	7	67	89	86	17	14	3	13	14	82	47	15	7	21	4
			2	1	4	7	3	2	6	3	2	16	7	7	6	5	2	27	3	2	1	7	7	20	7	7	4	3	7	28	98	
ЮЗАО			42	37	53	7	35	63	129	12	10	6	150	118	46	8	20	6	19	82	55	17	22	5	57	60	100	50	20	3	27	6
			7	7	5	19	5	4	3	7	7	26	1	5	4	7	6	23	7	3	6	6	6	22	5	4	2	2	5	18	108	
САО			68	82	96	1	34	55	231	17	34	4	120	137	41	41	30	2	149	63	63	19	51	2	130	286	103	44	39	2	22	2
			1	2	1	4	6	6	2	4	3	21	3	3	5	2	4	17	1	4	3	5	1	14	3	2	1	5	2	13	69	
ЮАО ТЭЦ2			51	76	46	4	60	54	114	14	30	5	70	81	64	10	67	5	63	37	56	28	35	6	71	96	35	35	79	4	24	5
			4	3	6	13	2	7	5	5	4	23	6	6	1	6	1	20	4	7	5	3	4	23	4	3	7	7	1	22	101	
МО			54	58	79	3	28	67	118	72	63	3	103	128	49	28	31	3	47	52	62	28	27	7	131	48	76	38	29	5	21	3
			3	5	2	10	7	3	6	4	7	16	5	4	3	3	3	18	5	6	4	4	5	24	2	5	5	6	4	22	90	

Место каждой ТЭЦ определяется сравнением результатов замеров на других филиалах в тот же самый день недели. Чем большее количество частиц зафиксировано в кубометре атмосферного воздуха, тем выше место занимает этот филиал в рейтинге. В графе Е по горизонтали голубым цветом указывается сумма мест, занятых ТЭЦ в течение недели. На основании этих данных определяется место ТЭЦ, занятое в рейтинге за неделю (выделено красным цветом): чем меньше сумма мест, тем более высокое положение (более загрязнен атмосферный воздух на всасе КВОУ) занимает филиал.

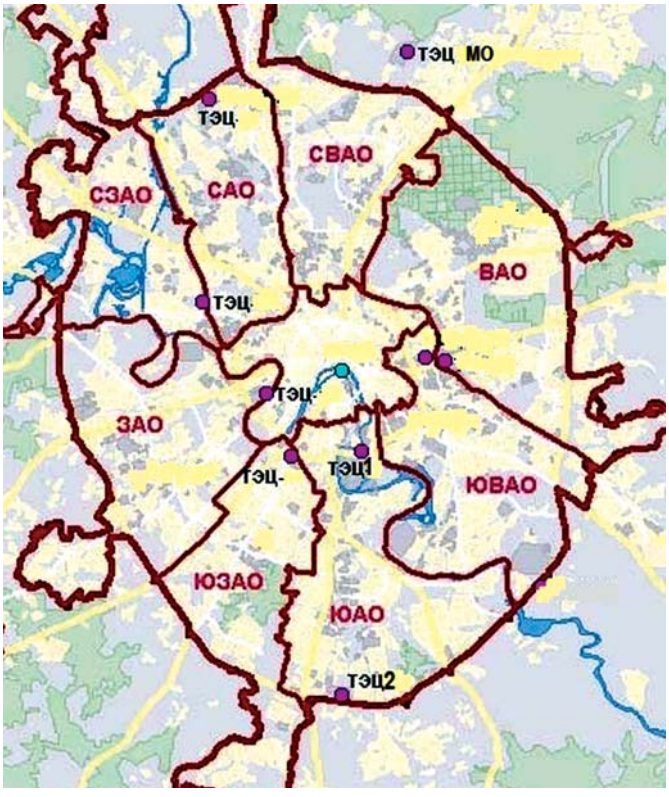
Если в течение недели несколько ТЭЦ набирают одинаковую сумму мест (например, ТЭЦ в СЗАО и ТЭЦ в ЗАО на 31 неделе), то более высокое место занимает филиал, у которого в этот промежуток времени было зафиксировано большее количество дней с наиболее высокими значениями количества частиц. В данном случае это ТЭЦ в ЗАО.

Сбор данных в формате *табл. 4.5* позволяет не только вести статистику результатов мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ и определять рейтинг загрязненности ТЭЦ, но и проводить сравнительный анализ изменения фоновых значений загрязненности атмосферного воздуха в течение дня, недели и месяца. Например, на 28-й неделе отмечен резкий рост значений количества частиц практически на всех филиалах с ПГУ. Это было обусловлено резким повышением температуры атмосферного воздуха 8 июля.

Аналогично 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 ЮЗАО и ТЭЦ в ЗАО, критерием, определяющим филиал с наиболее загрязненным воздухом, является сумма ежедневных мест. У ТЭЦ в ЗАО эта величина равна 112, а у ТЭЦ в ЮЗАО – 108. Следовательно, ТЭЦ в ЮЗАО занимает 6 место, а ТЭЦ ЗАО – 7 место в рейтинге загрязненности воздуха на всасе КВОУ среди филиалов с ПГУ за июль 2020 года.

Так же обрабатываются результаты мониторинга на всех ТЭЦ с ГТУ и определяется годовой рейтинг загрязненности атмосферного воздуха на всасах их КВОУ. Для наглядности и оценки влияния местоположения ТЭЦ целесообразно рейтинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ составлять с привязкой к карте местности. На *рис. 4.19* приведена схематичная карта Москвы с нанесенными на нее местами расположения ТЭЦ. На карте обозначены ТЭЦ с ГТУ и места этих филиалов в рейтинге 2021 года.



Рейтинг загрязненности воздуха за 2021 год
1. ЮАО ТЭЦ 1
2. СЗАО
3. САО
4. ЮЗАО
5. МО
6. ЮАО ТЭЦ 2
7. ЗАО

Рис. 4.19. Рейтинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ за 2021 год

В *табл. 4.6* представлены места в годовых рейтингах загрязненности воздуха на всасе КВОУ ГТУ за восемь лет мониторинга.

Места в годовых рейтингах загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ с 2015 по 2022 год ***Таблица 4.6***

ТЭЦ	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Сумма мест	Место
ЮАО, ТЭЦ-1	1	4	1	2	2	1	1	1	13	1
ЗАО	6	2	2	3	5	7	7	4	36	5
СЗАО	2	6	3	1	3	3	2	3	23	2
ЮЗАО	4	1	4	4	7	4	4	5	33	3
САО	3	5	6	7	5	5	3	2	36	6
ЮАО, ТЭЦ-2	5	3	5	5	1	2	6	7	34	4
МО	7	7	7	6	6	6	5	6	50	7

На основании полученных данных можно сделать вывод, что наиболее загрязненный воздух на всасе КВОУ ГТУ наблюдается на ТЭЦ-1 в ЮАО. Этот результат обусловлен близким расположением Третьего транспортного кольца и проектным решением по расположению КВОУ ГТУ. Наиболее чистый воздух, по сравнению с другими филиалами, зафиксирован на ТЭЦ в Московской области.

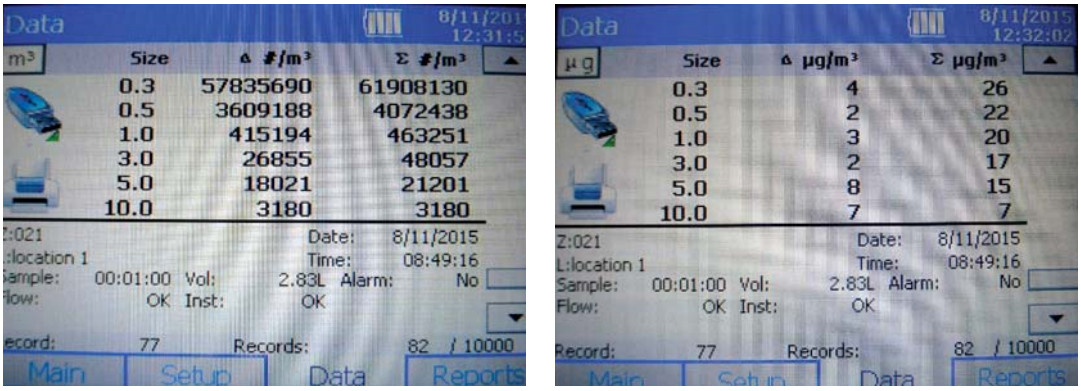
Количество и концентрация частиц в атмосферном воздухе меняется в зависимости от времени года, а также от месторасположения КВОУ ГТУ относительно рукотворных источников загрязнения окружающей среды в зависимости от превалирующих направлений «розы ветров» для каждой ТЭЦ индивидуально.

По мере роста массива информации от 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.

4.5.3. Влияние выбора систем фильтрации КВОУ на работу ГТУ

Наиболее эффективную систему фильтрации воздуха КВОУ можно выбирать на основании результатов мониторинга загрязненности атмосферного воздуха путем расчета количества пыли, поступающей в проточную часть осевого компрессора ГТУ, для каждой ступени очистки воздуха.

На *рис. 4.20* приведены результаты замеров атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ в МО, принятые для сравнительного анализа эффективности систем фильтрации.



а) *б)*

Рис. 4.20. Количество (а) и концентрация (б) частиц на всасе КВОУ ГТУ ТЭЦ в МО

Базовая комплектация всех четырех КВОУ ГТУ состоит из трех ступеней фильтрации, класс очистки фильтр-элементов G2+G4+F9. Кроме базовой системы фильтрации, к рассмотрению были приняты трехступенчатая система фильтрации с повышенными классами очистки первой и второй ступени G4+M5+F9 (вариант 1) и двухступенчатая система с использованием эффективных фильтров M6+E10 (вариант 2).

В *табл. 4.7* приведены результаты расчета поступления пыли в осевой компрессор ГТУ при различных системах фильтрации КВОУ (*табл. 4.7*).

Количество частиц пыли, проникающей в проточную часть осевого компрессора ГТУ при различных системах фильтрации КВОУ ***Таблица 4.7***

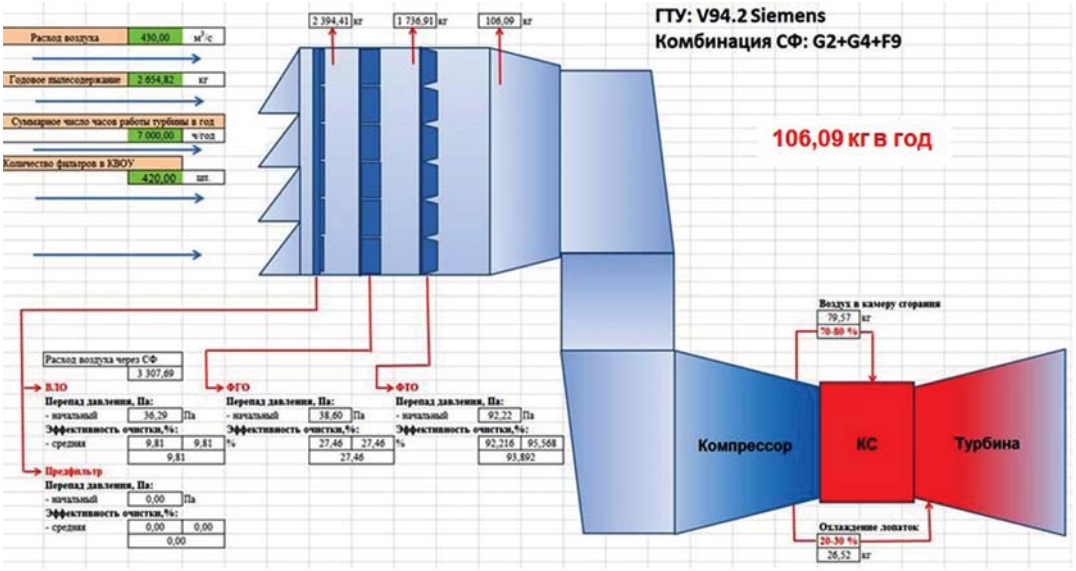
Размер частиц, мкм	Кол-во частиц перед системой фильтрации	Базовое решение G2+G4+F9	Вариант 1 G4+M5+F9	Вариант 2 M6+E10
0,3–0,5	57 835 690	2 313 428	1 599 041	520 521
0,5–1,0	3 609 188	70 379	34 697	7074
1,0–2,0	415 194	1661	544	7

Из представленных данных очевидно, что более эффективной является система фильтрации циклового воздуха ГТУ по второму варианту.

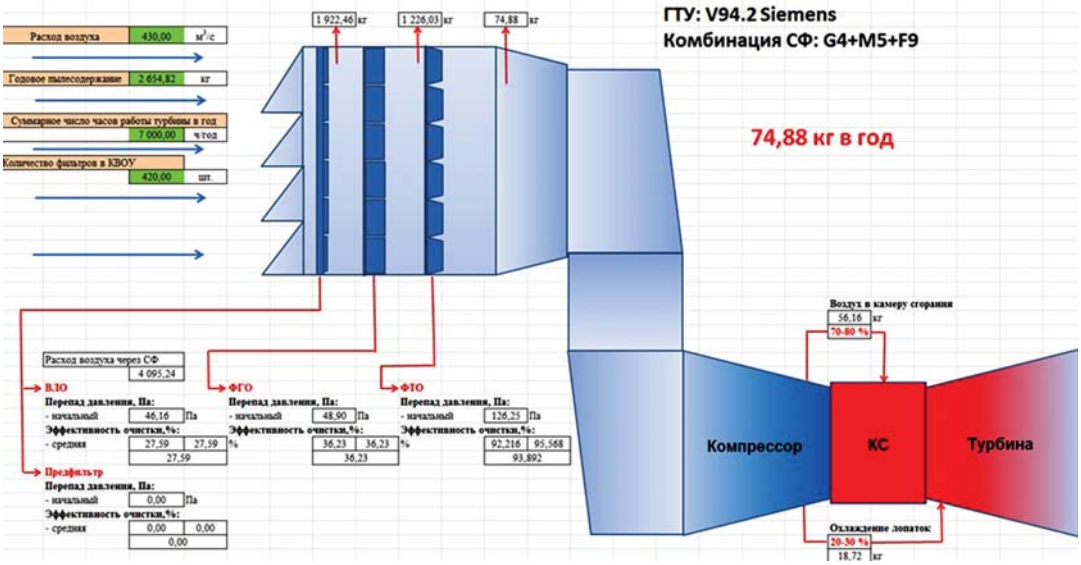
Расчет весового отложения пыли на лопатках осевого компрессора осуществлялся при одинаковых условиях эксплуатации ГТУ в течение 7000 часов в год. На *рис. 4.21* приведены значения отложения пыли по ступеням очистки циклового воздуха ГТУ и поступления в проточную часть турбомашины рассматриваемых систем фильтрации КВОУ.

Количество пыли, поступающей в проточную часть ГТУ в течение года, выделено красным цветом на каждом схематичном изображении воздухозаборного тракта ГТУ. Отложения пыли в проточной части ГТУ по

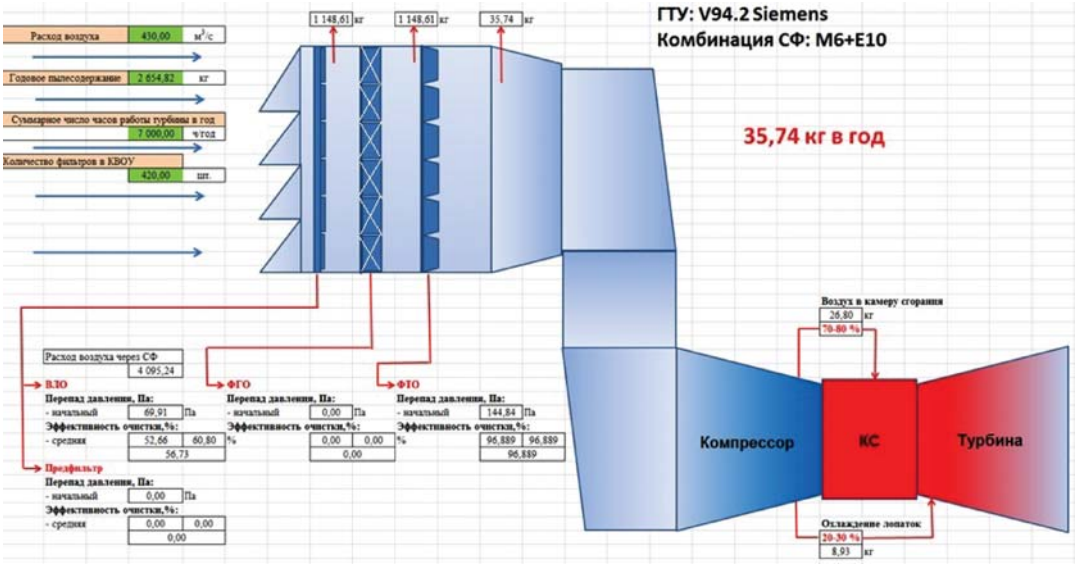
сравнению с базовой комплектацией системы фильтрации КВОУ могут снизиться в 1,34 раза при варианте 1 и в 2,97 раза при варианте 2. Безусловно, такое интенсивное снижение загрязненности циклового воздуха положительно скажется на состоянии проточной части и характеристиках ГТУ, а также на выработке электроэнергии блоком ПГУ.



а)



б)



в)

Рис. 4.21. Расчет количества пыли, поступающей в проточную часть компрессора ГТУ при различных системах фильтрации КВОУ:
а) базовая комплектация; б) вариант 1; в) вариант 2

На *рис. 4.22* изображена двухступенчатая система фильтрации циклового воздуха ГТУ M6+E10, внедренная на КВОУ ГТУ-32 ТЭЦ в МО. Применение новой системы фильтрации позволило сократить суммарные затраты на промывки компрессора в онлайн-режиме до 1,6 млн рублей на одну ГТУ. Срок службы фильтр-элементов при этом увеличился вдвое. Состояние лопаток ВНА компрессора после года эксплуатации не изменилось, хотя промывки осевого компрессора не проводились (*рис. 4.23а, б*) [10].

Рис. 4.22. Двухступенчатая система фильтрации КВОУ ГТУ-32 ТЭЦ в МО

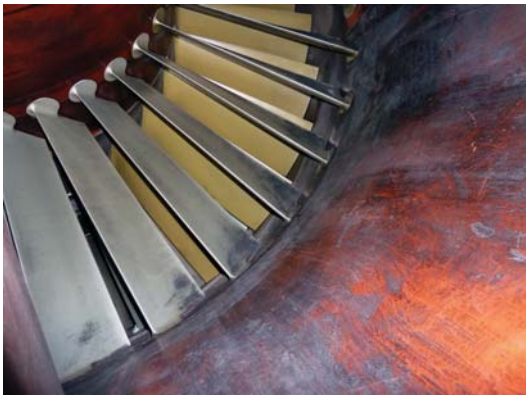
На *рис. 4.24* зафиксирован плавный рост перепада давления на фильтрах КВОУ ГТУ-32 вне зависимости от активной нагрузки ГТУ в течение года. Потеря мощности ГТУ, связанная с загрязнением проточной части компрессора, сократилась с 4 % до 0,5 % (*рис. 4.25*). На *рис. 4.26* видно, что расходные характеристики ГТУ-32 мало изменились по сравнению с «условно чистым» состоянием проточной части двигателя [10].

На параллельно работающей ГТУ-31 ТЭЦ в МО с фильтрами (G2+G4+F9) этого же производителя наблюдалась деградация мощности более 2 МВт за четыре месяца работы, сопровождающаяся резким (скачкообразным) перепадом давления на фильтрах КВОУ (*рис.4.27* и *4.28*) [10].

Состояние лопаток ВНА компрессора заметно ухудшилось за год работы, несмотря на проведение регламентных промывок осевого компрессора ГТУ (*рис. 4.30*).

Мониторинг влияния выбранной системы фильтрации циклового воздуха ГТУ на КВОУ ТЭЦ в МО продолжается уже в течение нескольких лет. На *рис. 4.31* [10] представлены тренды нагрузки на ГТУ-32 с 26.12.2018 по 17 06. 2020.

На *рис. 4.32* приведены перепады давления на фильтрах средней очистки класса М6 и фильтрах тонкой очистки класса Е10 в КВОУ этой ГТУ за этот же период времени [10].



а)

б)

Рис. 4.23. Состояние лопаток ВНА компрессора ГТУ-32 до и после установки фильтров класса М6+Е10: а) 08.09.2016 года (лопатки отмыты вручную); б) 03.08.2017 года (онлайн- и офлайн-промывки не проводились)

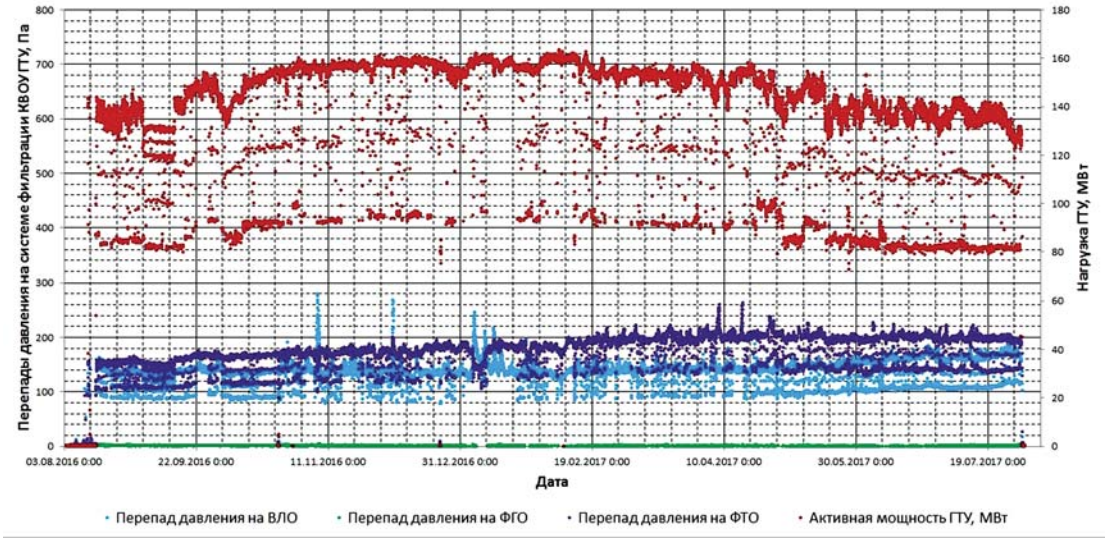


Рис. 4.24. Тренды перепадов давления на системе фильтрации КВОУ ГТУ-32 ГТЭ-160 ТЭЦ в МО в период с 04.08.2016 по 01.08.2017

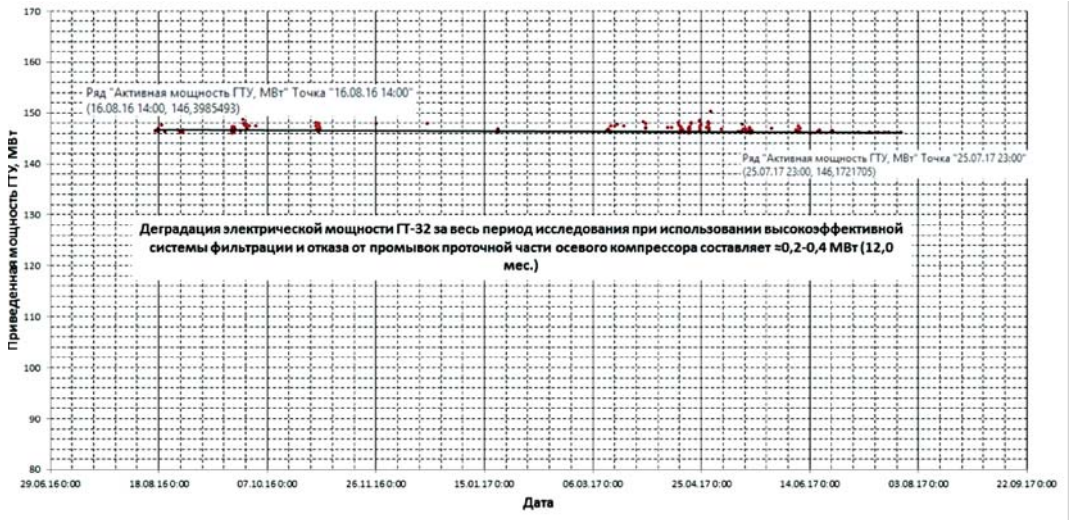


Рис. 4.25. График деградации приведенной мощности ГТУ-32 ГТЭ-160 ТЭЦ в МО вследствие загрязнения ОК при 87,0 %<ВНА≤89,0 %; АОС выкл. ($t_{нк} - t_{нв} \leq 1{,}5$ °С)

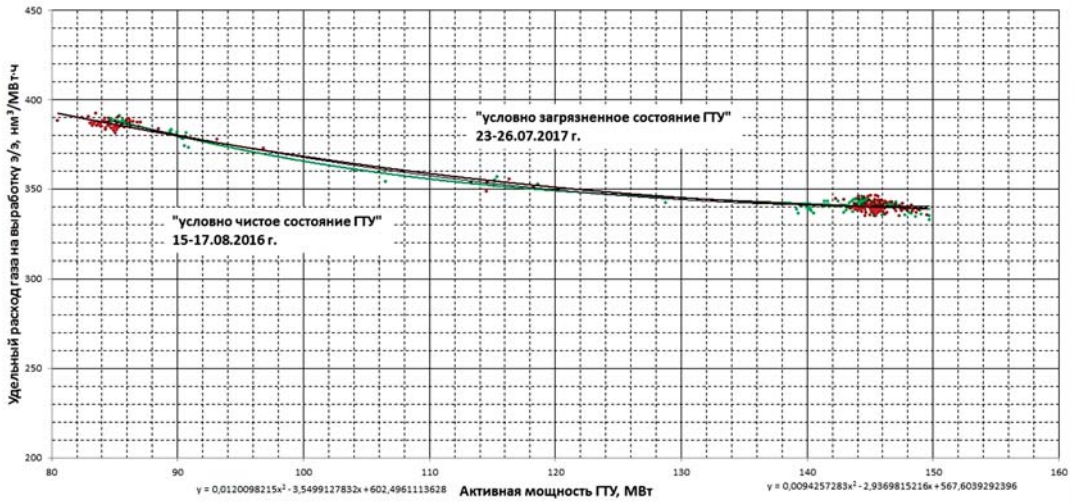


Рис. 4.26. График отклонения расходной характеристики ГТУ-32 ГТЭ-160 ТЭЦ в МО вследствие загрязнения проточной части осевого компрессора

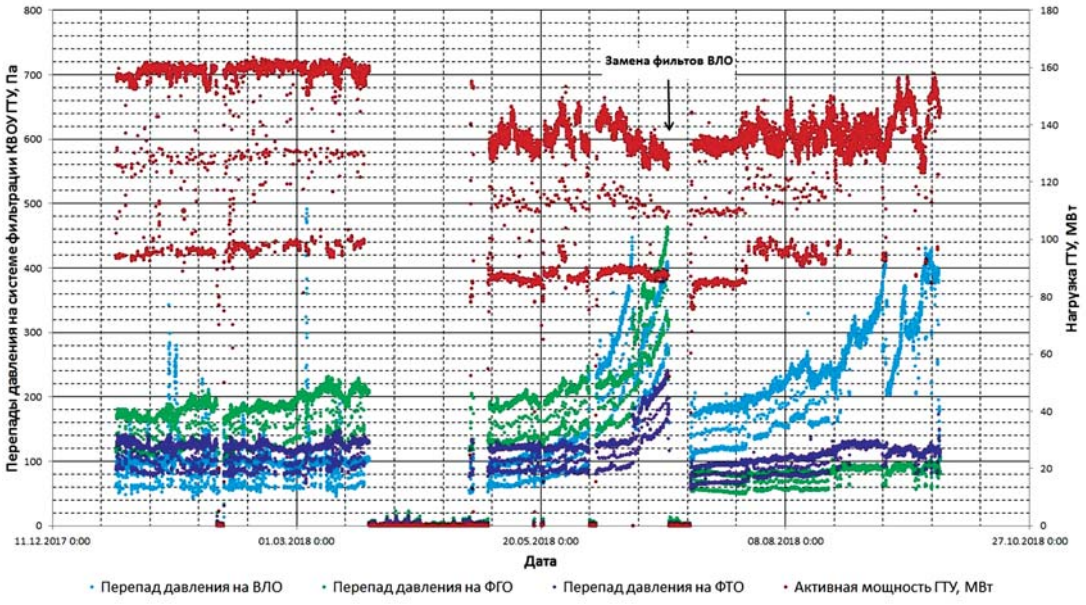


Рис. 4.27. Тренды перепадов давления на системе фильтрации КВОУ ГТУ-31 ГТЭ-160 ТЭЦ в МО с 01.01.2018 по 28.09.2018

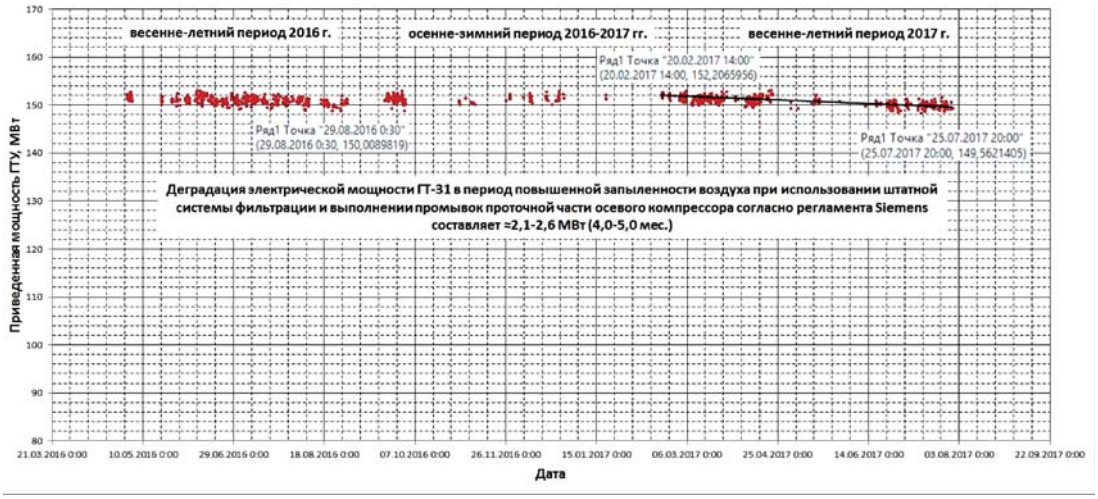


Рис. 4.28. График деградации приведенной мощности ГТУ-31 ГТЭ-160 ТЭЦ в МО вследствие загрязнения ОК при 87,0 %<ВНА≤89,0 %; АОС выкл. ($t_{нк} - t_{нв} \leq 1{,}5$ °C)

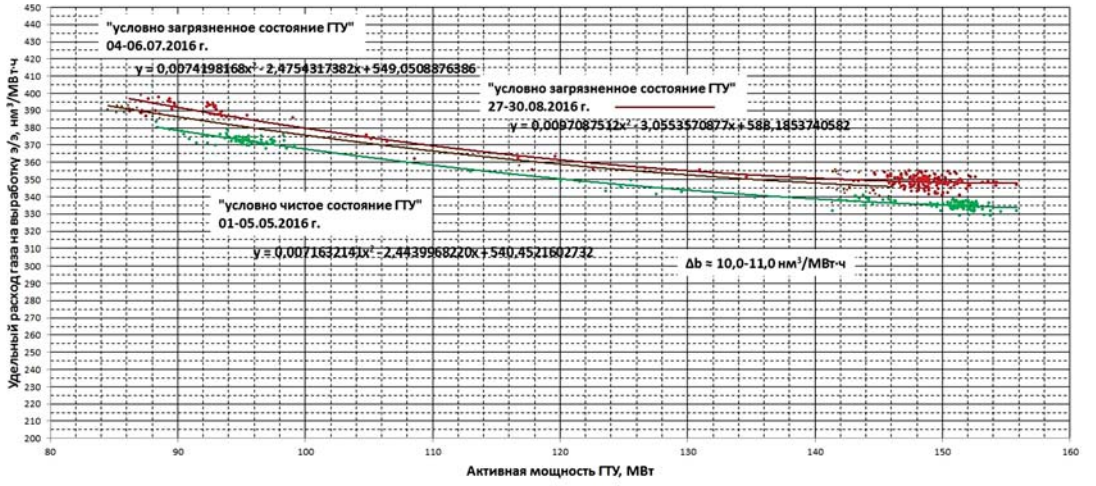
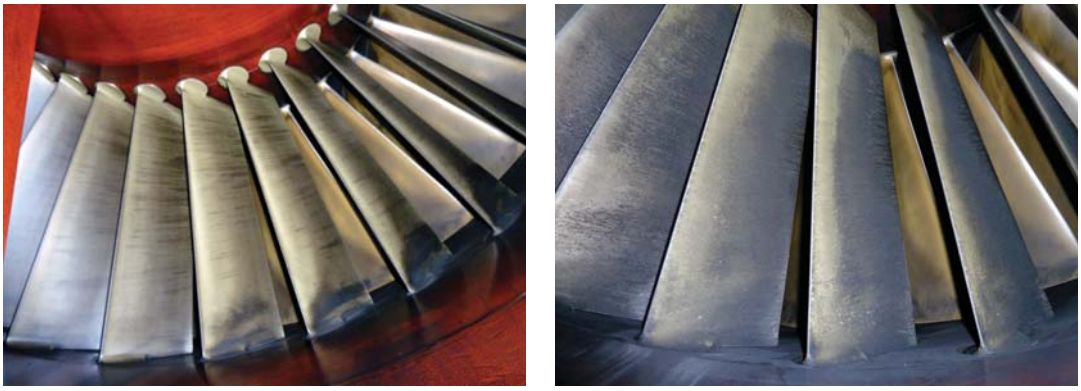


Рис. 4.29. График отклонения расходной характеристики ГТУ-31 ГТЭ-160 ТЭЦ в МО вследствие загрязнения проточной части осевого компрессора



а) *б)*

Рис. 4.30. Состояние лопаток ВНА осевого компрессора ГТУ-31 до и после установки штатной системы фильтрации G2+G4+F9: а) 18.04.2016 года (после отмывки); б) 03.08.2017 года (онлайн- и офлайн-промывки проводились по регламенту Siemens AG)

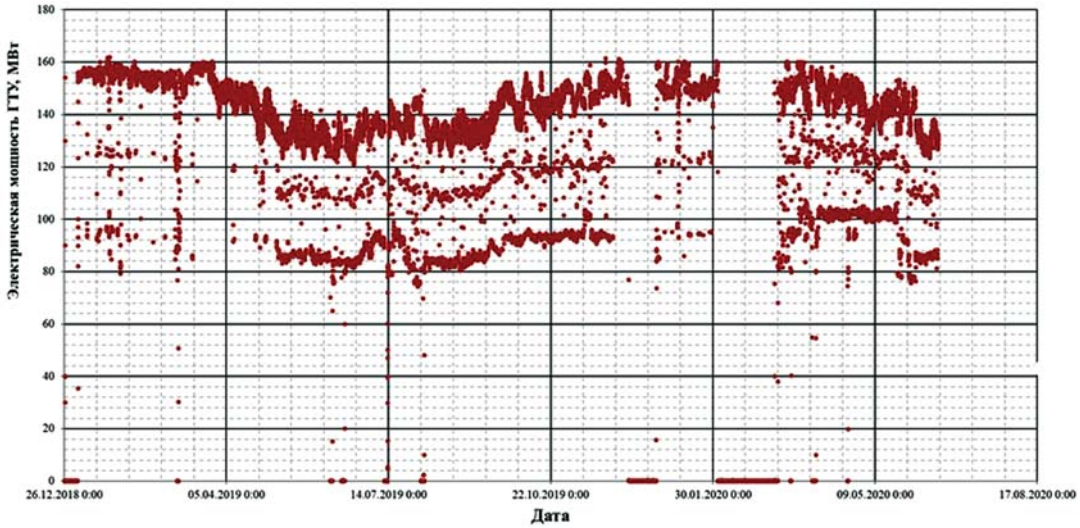


Рис. 4.31. Тренды нагрузки на ГТУ-32 ТЭЦ в МО

Несмотря на различный уровень электрической мощности ГТУ-32 на представленных графиках, на ФСО и ФТО отмечался плавный, а не скачкообразный рост перепада давления. Применение в КВОУ фильтров классов М6 и Е10 позволило добиться незначительной деградации мощности из-за загрязнения проточной части ГТУ по сравнению с базовой системой очистки воздуха того же производителя, установленной ранее (*рис. 4.33*).

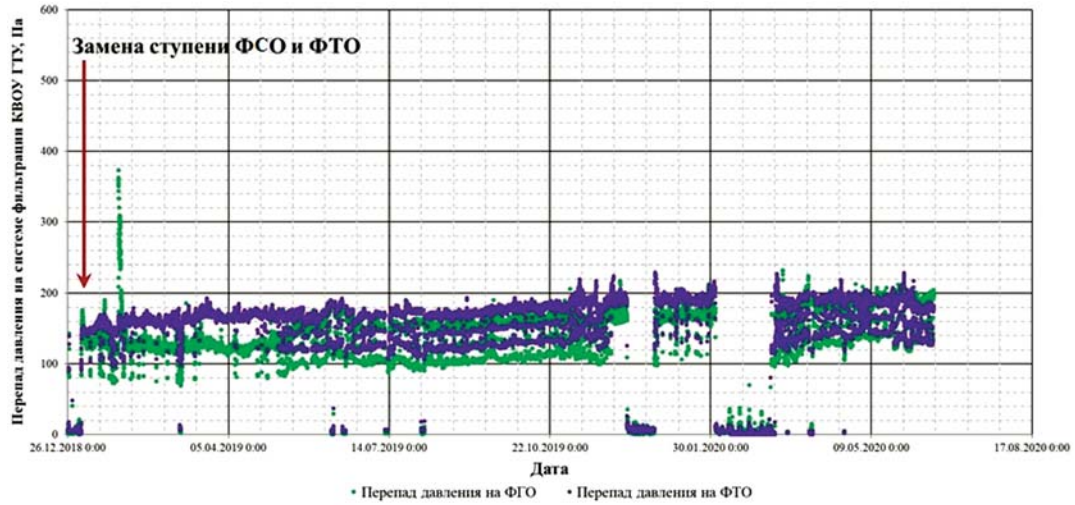


Рис. 4.32. Тренды перепадов давления на фильтрах КВОУ ГТУ-32

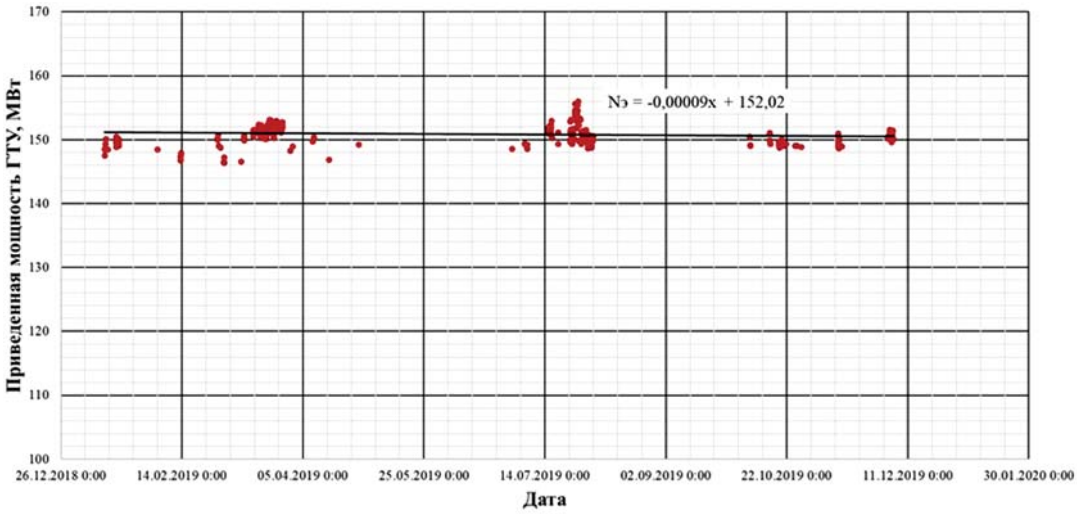


Рис. 4.33. Зависимость приведенной мощности ГТУ-32 от наработки при ВНА 95 %

Деградация мощности ГТУ, обусловленная загрязнением проточной части турбомашины, существенно влияет на расход топливного газа в процессе эксплуатации. При эффективной системе очистки циклового воздуха ГТУ потери выработки электрической мощности снижаются, а расход топлива возрастает незначительно (*рис. 4.34*) [10].

Была выполнена оценка эксплуатационных затрат ТЭЦ в МО, связанных с качеством подготовки циклового воздуха ГТУ. Суммарные финансовые издержки при базовой системе фильтрации G2+G4+F9, установленной на КВОУ-31, в 24 раза выше, чем на КВОУ-32 с двухступенчатой системой фильтров класса M6+E10.

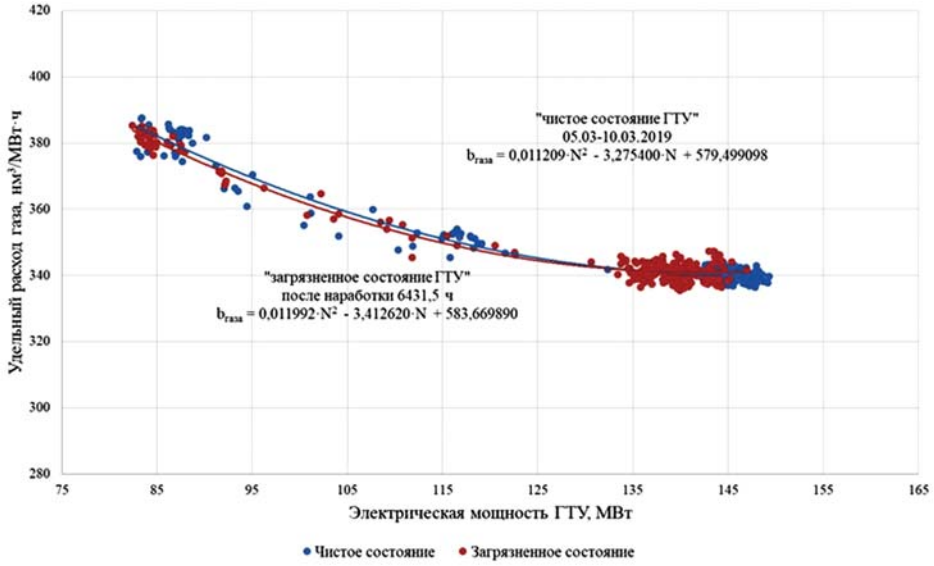


Рис. 4.34. Зависимость удельного расхода топливного газа от мощности ГТУ-32

1. В расчетах использовались усредненные значения измеренных параметров по количеству датчиков. Приведение к условиям ISO осуществляется путем деления замеренного значения показателя на коэффициент приведения:

$$N_{\text{прив}}^{\text{ПГУ}} = \frac{N_{\text{изм}}^{\text{ПГУ}}}{\Pi_{i=1}^{n}\delta N_i};\ \eta_{\text{прив}}^{\text{ПГУ}} = \frac{N_{\text{изм}}^{\text{ПГУ}}}{B_{\text{изм}}^{\text{ПГУ}} \cdot Q_{\text{нр}} \cdot \Pi_{i=1}^{n}\delta\eta_i};\ B_{\text{изм}}^{\text{ПГУ}} = \frac{N_{\text{прив}}^{\text{ПГУ}}}{\eta_{\text{прив}}^{\text{ПГУ}}}$$

2. Построенные тренды основных режимов работы двигателя при постоянном угле входного направляющего аппарата определяют степень деградации приведённой мощности. Постепенное снижение мощности ПГУ приводит к упущенной выгоде, связанной с недопоставкой электроэнергии:

$$\Delta Д_{э/э} = \sum_{i=0}^{i=n}(N_{\text{баз. знач.}} - N_i)\cdot(\text{Т}_{э/э} - S_{э/э}),$$

3. Загрязнение осевого компрессора ГТУ приводит к постепенному увеличению расхода газа на выработку единицы электроэнергии и носит прогрессивный характер:

$$\sum \text{И}_{\text{Т}} = \sum_{i=0}^{i=n}(b_i - b_{\text{баз. знач.}})\cdot N_i \cdot S_{\text{топливо}}$$

4. Суммарные затраты на промывки проточной части ГТУ:

$$\sum И_{\text{промывки}} = N_{онлайн} \cdot З_{онлайн} + N_{офлайн} \cdot З_{офлайн}$$

Оцениваются следующие виды издержек:

1. Недопоставка электроэнергии в сеть рассчитывается согласно данной формуле.

$N_{\text{баз. знач.}}$ – фиксированное значение приведенной мощности ГТУ, соответствующее максимальному режиму работы (ВНА максимально открыт > 99,0 %) и исходному состоянию проточной части осевого компрессора (после ремонта / промывки)

N_i – значение приведенной мощности ГТУ, соответствующее максимальному режиму работы (ВНА максимально открыт > 99,0 %) и состоянию проточной части осевого компрессора за каждый *i*-й час наработки, МВт;

$T_{э/э}$ – отпускной тариф на выработку мегаватт-часа электроэнергии (расчетное значение 1300 руб/МВт·ч); $S_{э/э}$ – себестоимость мегаватт-часа (расчетное значение 800 руб/МВт·ч).

2. Вторая оцениваемая издержка – перерасход газового топлива рассчитывается по представленной формуле.

b_i – удельный расход газа в КС ПГУ за каждый *i*-й час наработки ГТУ,

$b_{\text{баз. знач.}}$ – удельный расход газа в КС, соответствующий чистому состоянию ПГУ;

N_i – приведенная мощность за каждый *i*-й час наработки ПГУ;

$S_{\text{топливо}}$ – расчетная стоимость природного газа, принятая в расчете 4800 руб/1000нм^3.

3. Так же оцениваются затраты на промывки осевого компрессора.

Стоимость применяемого моющего средства Siwash, принятая в расчете, – 950,0 руб/литр, антифриза 380,0 руб/литр.

N – количество онлайн/офлайн промывок;

З – затраты на одну онлайн/офлайн промывку.

4.6. Модернизация КВОУ энергетических ГТУ с целью качественного мониторинга загрязненности воздушных фильтров по перепадам давления

Системы фильтрации циклового воздуха КВОУ ГТУ на ТЭЦ в Москве состояли в основном из трех ступеней: фильтры–коагуляторы (влагоотделители – ВО), фильтры грубой/средней очистки (ФГО/ФСО) и фильтры тонкой очистки (ФТО). Замена воздушных фильтров на

КВОУ ГТУ согласно ГОСТ Р ЕН 779:2014 осуществляется по величине перепада давления. 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 ведется штатным датчиком, установленным на одном из ярусов КВОУ для каждой ступени фильтрации воздуха. Таким образом, для трехступенчатой системы фильтрации циклового воздуха ГТУ используются три датчика давления (по одному на каждую ступень фильтрации).

На *рис. 4.35* представлен мнемокадр показания датчиков перепада давления на КВОУ с односторонним всасом атмосферного воздуха ГТЭ-160 ТЭЦ в ЗАО. Как видно из мнемокадра, замер показаний датчиков давления на фильтрах осуществляется только на одном (нижнем) из трех ярусов КВОУ. КВОУ ГТУ имеют как односторонний всас атмосферного воздуха, так и трехсторонний. Количество ярусов КВОУ ГТУ (по высоте) – 3–4. Как показали результаты мониторинга, на эксплуатацию воздушных фильтров КВОУ ГТУ существенное влияние оказывает «роза ветров» с превалирующим направлением ветра, приносящего наибольшее количество загрязнений на один из всасов КВОУ. На других всасах и ярусах КВОУ запыленность воздуха значительно ниже [11]. Аналогичные процессы протекают и по высоте КВОУ с односторонним всасом (*см. рис. 4.2*). Кроме того, 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 [12].

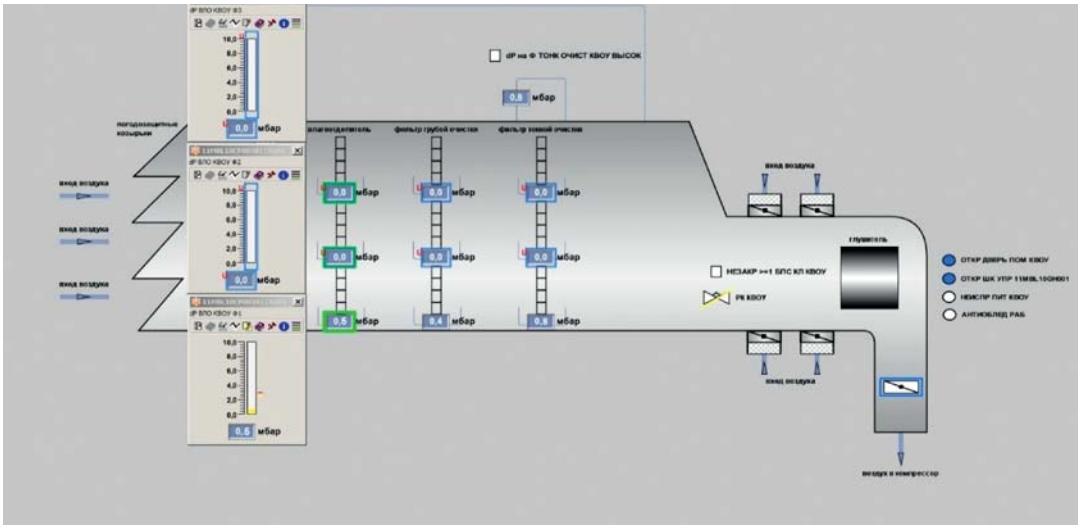


Рис. 4.35. Мнемокадр показаний датчиков давления на первом ярусе КВОУ ГТЭ-160

Существенного влияния на показания датчиков давления такие инциденты обычно не оказывают. Однако ситуация, показанная на *рис. 4.36*, 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 результате произошел резкий скачок давления на второй и третьей ступени фильтрации циклового воздуха ГТУ и на всем КВОУ.

Из приведенных примеров 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 осуществляется по показаниям всего одного датчика давления, установленного на одном из ярусов КВОУ.

Таким образом, происходит необоснованная замена воздушных фильтров, приводящая к сокращению их жизненного цикла и росту финансовых затрат на закупку новых комплектов фильтров КВОУ ГТУ. 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. С учетом того что на 11 КВОУ ГТУ установлено около 14 тыс. воздушных фильтров, финансовые потери на закупку такого количества фильтр-элементов могли 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 ГТЭ-160 было принято техническое решение об оснащении

Рис. 4.36. Выпадение фильтра-коагулятора и дросселирование им фильтров второй и третьей ступени очистки воздуха

КВОУ дополнительными датчиками перепада давления на всех его ярусах и всасах. С этой целью были изготовлены два бокса (короба) из нержавеющей стали для размещения в них фильтров второй и третьей ступени (средней и тонкой очистки) КВОУ (*рис. 4.36*), а также соответствующих датчиков давления. Боксы были установлены на второй (средний) и третий (верхний) ярусы КВОУ, а также была выполнена трассировка импульсных линий и кабельных трасс для датчиков давления. На площадке обслуживания верхнего яруса КВОУ размещен изготовленный шкаф для установки датчиков давления. Мнемокадр показаний штатных и вновь установленных датчиков давления в КВОУ ГТУ представлен на *рис. 4.37* [12].

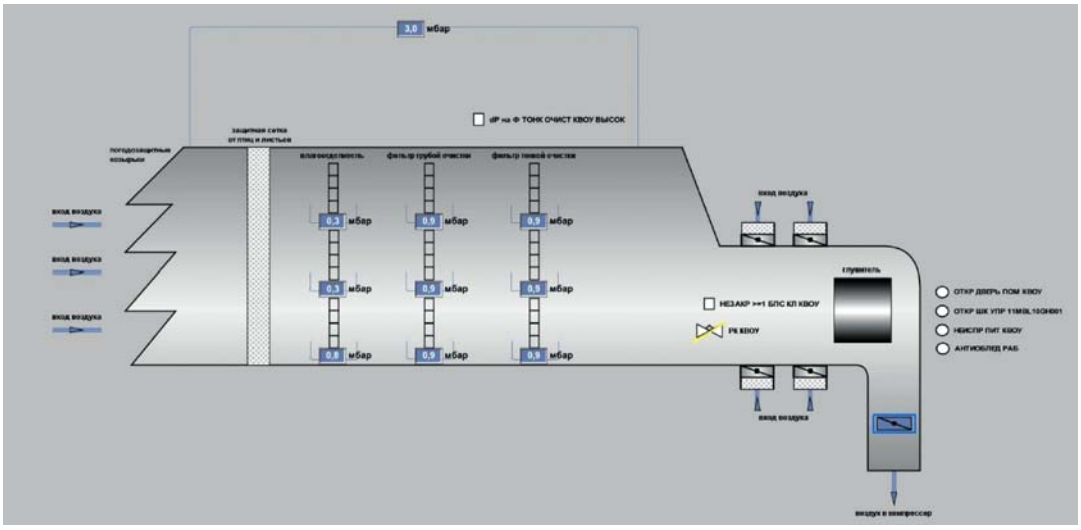


Рис. 4.37. Мнемокадр показаний датчиков давления на всех ярусах КВОУ ГТЭ-160

После получения фактических значений перепадов давления на воздушных фильтрах КВОУ ГТУ стали заменять только те фильтр-элементы, на которых было достигнуто предельно-допустимое значение перепада давления согласно ГОСТ.

Это позволило уменьшить время останова ГТУ, снизить трудозатраты на замену фильтров КВОУ и финансовые затраты на их закупку.

На базе результатов мониторинга произведено ранжирование ТЭЦ по уровню загрязненности атмосферного воздуха ГТУ. По итогам оценки эксплуатационных затрат разработан перечень мероприятий для правильного выбора систем фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ. В *табл. 4.8* приведены данные о базовых системах фильтрации циклового воздуха, поставленных на ТЭЦ вместе с КВОУ ГТУ и вновь установленных по результатам мониторинга.

Изменение класса очистки систем фильтрации КВОУ ГТУ *Таблица 4.8*

ТЭЦ	Базовая система фильтрации	Новая система фильтрации	Примечание
ЮАО, ТЭЦ-1	G2+G4+F9	G4+G4+F9+C	Установлена С
ЗАО	G4+M5+F9+C	M6+E11+C	
СЗАО	G4+G4+F8+C	G4+F8+E10+C	
ЮЗАО	G4+G4+F8+C	G4+F8+E10+C	
САО	G2+G4+F9	M6+E11+C	Установлена С
ЮАО, ТЭЦ-2	G2+G4+F8	G2*+M6+E11+C	Установлена С
МО	G2+G4+F9	M6+E10+C	Установлена С

**конструктивные особенности КВОУ не позволяют изменить класс фильтров*

Из *табл. 4.8* видно, как изменилась эффективность систем фильтрации циклового воздуха КВОУ ГТУ. Практически на всех ТЭЦ в качестве конечной (финишной) ступени очистки применены эффективные фильтры группы Е. КВОУ переведены на двухступенчатые системы фильтрации, в результате чего количество фильтров сократилось на 18 %. Там где проектом не были предусмотрены штатные противомоскитные сетки (С), установлены нештатные. Мониторинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе ярусов КВОУ в совокупности с установкой дополнительных датчиков давления на каждой ступени очистки циклового воздуха ГТУ позволяет определить наиболее нагруженные пылью фильтры и принять своевременные меры по их замене, а не менять весь комплект фильтров.

Резюме:

– мониторинг атмосферного воздуха на всасе КВОУ является единственно верным источником информации о реальном состоянии окружающей среды;

– для получения объективных данных и корректного сравнительного анализа загрязненности атмосферного воздуха энергетической компании необходимо все ТЭЦ с ГТУ снабдить одинаковыми по классу счетчиками частиц;

– из специалистов ТЭЦ с ПГУ целесообразно сформировать и подготовить группу для мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на всасах КВОУ ГТУ;

– для корректного составления рейтинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ мониторинг необходимо проводить в одинаковый промежуток времени;

– 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;

– 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;

– результаты рейтинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ позволяют оптимизировать финансовые затраты на закупку и создание неприкосновенного запаса воздушных фильтров, тем самым снижая нагрузку на складские помещения энергетических компаний;

– установка датчиков давления на всех ярусах и всасах воздухозаборного тракта ГТУ совместно с замерами загрязненности атмосферного воздуха позволяет проводить качественный мониторинг жизненного цикла воздушных фильтров КВОУ и оптимизировать финансовые затраты на их закупку.

Самый редкий вид дружбы –
это дружба с собственной головой

Омар Хайям

Глава 5
ВЛИЯНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ НА УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ КВОУ ГТУ

5.1. Анализ проектных решений по размещению ВЗТ для ГТУ

В 2005–2006 годах велось проектирование ГТУ-ТЭЦ для ТЭЦ-1 в ЮАО Москвы, в состав которой первоначально входила ГТЭ-65 (ЛМЗ), а затем ГТУ AE64.3A (Ansaldo Energia, Италия) мощностью 65 МВт. Проектант разместил оборудование таким образом, что КВОУ оказалось перед стеной помещения котла-утилизатора (*рис. 5.1*). Для обеспечения подвода расчетного количества циклового воздуха было принято решение о разработке ВЗТ с тремя всасами.

Рис. 5.1. КВОУ ГТУ ТЭЦ-1 в ЮАО перед стеной котла-утилизатора

С целью снижения влияния атмосферных осадков на работу воздушных фильтров КВОУ его всасы были оснащены погодными козырьками, периметр которых равен 21 750 мм (правая часть – 1960 мм, левая часть – 1930 мм, центральная часть – 17 860 мм, что в процентном соотношении составляет по 9 % справа и слева и 82 % по центру). Помещение котла-утилизатора (КУ) затеняет (перекрывает) 14 720 мм (82,4 %) центрального всаса КВОУ. Погодные козырьки длиною 1200 мм центрального всаса расположены на расстоянии 1400 мм от стенки котла-утилизатора. КВОУ установлено на высоте 13 600 мм над уровнем земли и имеет радиальный размер 7050 мм.

Определение положения (рекогносцировка) КВОУ на территории ТЭЦ-1 в ЮАО относительно «розы ветров» было выполнено с помощью глобальной навигационной системы «Глонасс» и сверено с генеральным планом ТЭЦ. Голубая стрелка на *рис. 5.2* указывает центральный всас КВОУ [1].

Как видно из *рис. 5.2*, превалирующим направлением ветра является западное. Правый всас КВОУ ориентирован в сторону Третьего транспортного кольца, а левый – на территорию ТЭЦ-1.

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

Рис. 5.2. Рекогносцировка положения КВОУ относительно «розы ветров» на ТЭЦ-1 в ЮАО

На *рис. 5.3* 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 (мг/м^3) на центральном всасе КВОУ (от 55 до 97 %), характеризующий неравномерное по

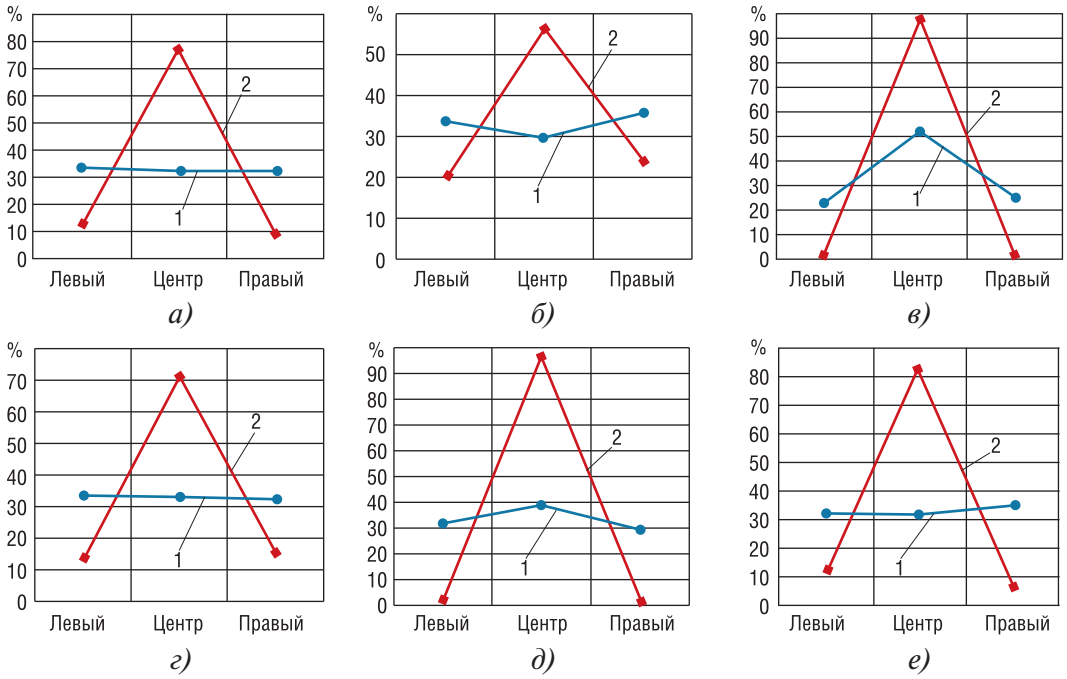


Рис. 5.3. Процентное распределение количества (1) и концентрации (2) взвешенных частиц в кубометре атмосферного воздуха по всасам КВОУ: а) 02.11.2015; б) 04.05.2016; в) 13.05.2016; г) 03.06.2016; д) 09.01.2017; е) 11.05.2017

всасам поступление массы загрязнений на воздушные фильтры вне зависимости от времени года. Процентное распределение количества частиц в кубометре атмосферного воздуха по всасам КВОУ не так однозначно. Только при высокой концентрации частиц 97 % наблюдалось совпадение направления экстремумов обеих величин (*рис. 5.3в, д*). В остальных случаях зафиксировано примерно одинаковое процентное распределение [1].

Абсолютные значения количества и концентрации взвешенных частиц в атмосферном воздухе на центральном всасе КВОУ приведены в *табл. 5.1.*

Результат мониторинга атмосферного воздуха на центральном всасе КВОУ ***Таблица 5.1***

Дата замера	Кол-во частиц, 1/м^3	Концентрация частиц, мг/м^3	Содержание частиц 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. 5.1* 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, выполненных в июне 2016 года.

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

Особое внимание при анализе результатов мониторинга обращают на себя высокие значения концентрации взвешенных частиц на центральном всасе КВОУ. Концентрация пыли ≥ 500 мг/м^3 фиксировалась во время пылевых бурь в пустынях [2]. 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 том случае, если это частицы песка и сухой пыли без примеси несгоревших углеводородов от выхлопа автомобильного транспорта. Для ТЭЦ-1 в ЮАО 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. 5.4*) [9].

Общее количество частиц в центре КВОУ в 2 раза, а общая концентрация в 68,3–75,5 раза больше, чем на других всасах. При этом процентное содержание мелкодисперсных частиц на центральном всасе очень низкое, всего 47,2 %, что примерно в 2 раза меньше величин за-

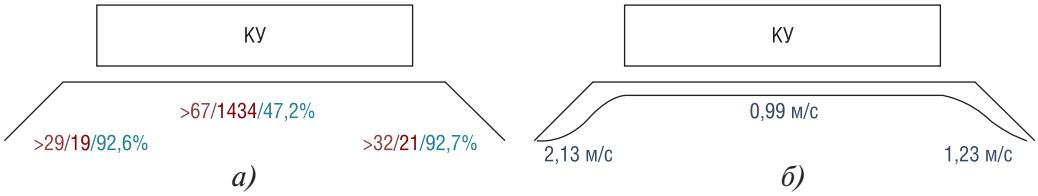


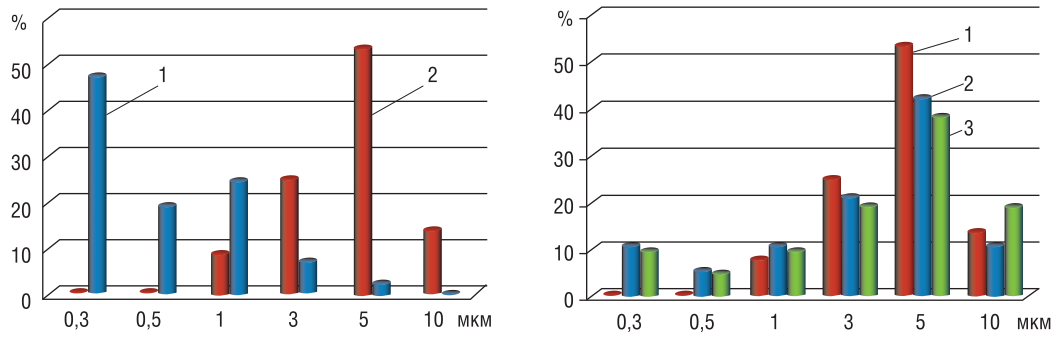
Рис. 5.4. Результаты мониторинга потока атмосферного воздуха на всасах КВОУ 13.05.2016: а) количество, концентрация и процентное содержание мелкодисперсных частиц 0,3 мкм; б) скорость потока атмосферного воздуха на всасах КВОУ

меров 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 (*см. рис. 5.4б*).

Логично было бы иметь большее количество и концентрацию 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 кубометре атмосферного воздуха в зависимости от их дисперсности перед всасами КВОУ. На *рис. 5.5а* 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 % [1].



а) *б)*

Рис. 5.5. Гистограммы процентного распределения количества и концентрации частиц на всасах КВОУ по результатам замеров 13.05.2016: а) процентное распределение количества (1) и концентрации (2) частиц на центральном всасе КВОУ; б) процентная концентрация частиц в зависимости от их дисперсности. 1 – центральный всас; 2 –правый всас; 3 – левый всас

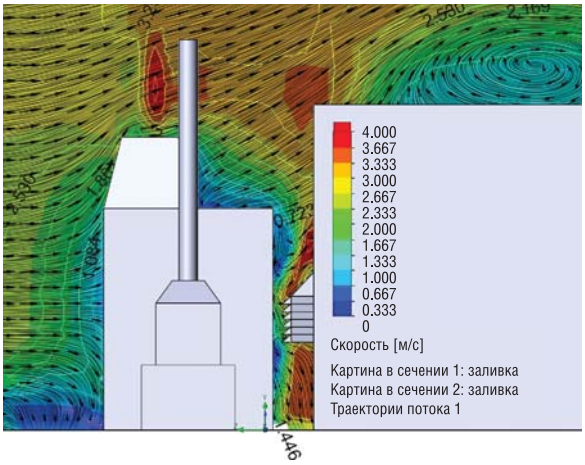
Как отмечалось ранее, количество мелкодисперсных частиц размером 0,3 мкм мало по сравнению с процентным содержанием этого показателя на других всасах КВОУ (*рис. 5.5а*). При этом концентрация частиц этого размера тоже незначительна, всего 0,14 %. Таким образом, влияние мелкодисперсных частиц на работу воздушных фильтров, установ-

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

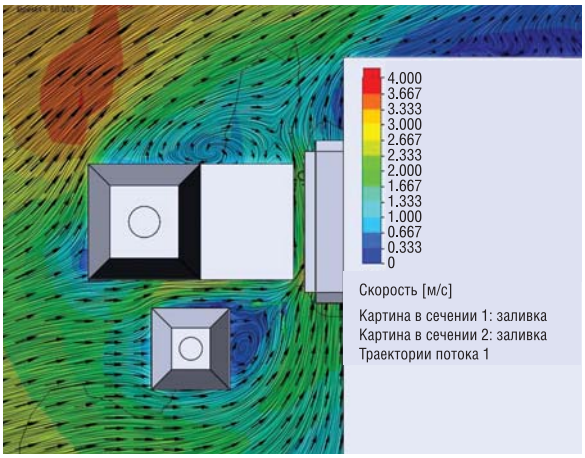
На *рис. 5.5б* для сравнения приведены гистограммы процентной концентрации частиц в зависимости от их дисперсности на всасах КВОУ. На всех всасах зафиксирована наибольшая концентрация частиц размером 5 мкм, что говорит о превалирующем значении этих частиц в атмосферном воздухе ТЭЦ-1 в ЮАО. Концентрация мелкодисперсных частиц размером 0,3 мкм на центральном всасе на 9–10 % 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 рассмотренных выше 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 в технических и природных объектах, а также визуализации течений методами компьютерной графики. Программа Solid Works Flow Simulation основана на конечно-объемном методе решения уравнений гидро- и газодинамики с использованием прямоугольной адаптивной сетки с локальным измельчением. При построении 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.

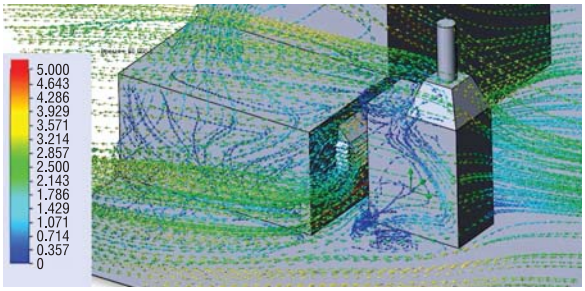
На *рис. 5.6* представлена картина обтекания воздушным потоком помещения котла-утилизатора с рядом стоящими зданиями и поля скоростей на всасе КВОУ ТЭЦ-1. При достижении стены помещения КУ воздушный поток тормозится, образуя у ее основания зону завихрения с пониженной скоростью воздушного потока (*рис. 5.6а*). Зоны разрежения также образуются на подветренной стороне помещения котла-утилизатора и рядом стоящих зданий (*рис. 5.6а, б*). В результате обтекания зданий воздушным потоком восточного направления происходит трансформация поля скоростей на всасах КВОУ [1]. Как видно из эпюр и векторов скоростей, воздушный поток устремляется в зазор между зданием КУ и КВОУ со стороны территории ТЭЦ-1 в ЮАО (*рис. 5.6б*).



а)



б)



в)

Рис. 5.6. Поле скоростей воздушного потока при обтекании помещения котла-утилизатора с рядом стоящими зданиями и всаса КВОУ ТЭЦ-1: а) вид сбоку; б) вид сверху; в) вид сбоку в изометрии

Следовательно, скорость потока на левом всасе КВОУ выше, чем на остальных. Сравнивая результаты замеров, представленные на *рис. 5.4б*, со значениями скоростей на *рис. 5.6а*, *б*, приходим к выводу, что расчетная аэродинамическая модель течения воздушного потока воздуха на ТЭЦ-1 в ЮАО 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-1 (*рис. 5.6а*). Под воздействием силы тяжести эти взвешенные в атмосферном воздухе вещества оседают в зазоре между зданием КУ и КВОУ, образуя устойчивые отложения.

В зимний период (09.01.2017), как следует из *табл. 5.1* и *рис. 5.3д*, в зазор затягивается большое количество снега, образуя высокую концентрацию взвешенных частиц. Процентное распределение концентрации взвешенных частиц на центральном всасе КВОУ достигало 97 % по сравнению с другими всасами. Аналогичная концентрация была зафиксиро-

вана и 13 мая 2016 года. Результаты мониторинга загрязнения атмосферного воздуха на всасах КВОУ показывают устойчивую тенденцию образования высоких концентраций взвешенных в атмосферном воздухе частиц в зазоре между зданием машинного зала и помещением КУ.

Картина течения воздушного потока при превалирующем направлении западного ветра согласно «розе ветров» представлена на *рис. 5.7* [1].

Здание машинного зала ниже корпуса КУ по высоте, 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 в ЮАО (*см. рис. 5.3 и 5.4а*).

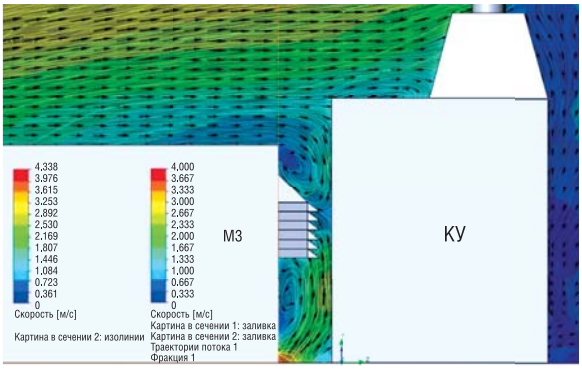


Рис. 5.7. Поле скоростей воздушного потока при западном направлении ветра

Еще одним неоптимальным проектным решением размещения ВЗТ ГТУ по отношению к источникам загрязнения циклового воздуха можно считать ориентацию КВОУ (*рис. 5.8*) [2].

Односторонний всас КВОУ ГТУ направлен на железнодорожный вокзал и находится от его границы (забора) на расстоянии всего пяти метров. Железнодорожный вокзал с его многочисленными дорожными путями и постоянным движе-

Рис. 5.8. Всас КВОУ ГТУ ориентирован на железнодорожный вокзал

нием поездов является рукотворным источником интенсивного загрязнения циклового воздуха, поступающего на всас ГТУ. Очевидным решением этой проблемы могло бы стать проектирование ВЗТ с двухсторонними всасами КВОУ, как это было сделано для ГТУ General Electric PG 9311FA на ТЭЦ Delesto (*см. рис. 2.6*). В этом случае всасы КВОУ были бы сориентированы вдоль границы железнодорожного вокзала, что существенно снизило бы уровень загрязнений, поступающих в систему фильтрации циклового воздуха ГТУ. Решение очевидное, но не реализованное.

Причина – трафаретный подход к проектированию энергоблоков ПГУ без учета требований документа «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок» РАО «ЕЭС России».

5.2. Причины различия в условиях эксплуатации рядом стоящих КВОУ с односторонним всасом атмосферного воздуха

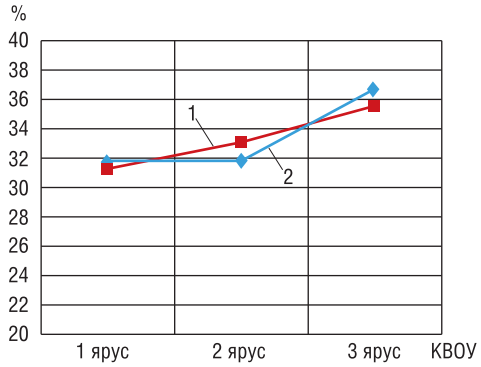
Другим примером влияния проектных решений на работу КВОУ является блок ПГУ на ТЭЦ в САО. На *рис. 5.9* представлены два рядом стоящие КВОУ Б и В с односторонним всасом производства компании Camfil Farr (Швеция) [3]. Расстояние между ними по ширине сервисной площадки, установленной между КВОУ, составляет три метра. Интересным представляется распределение процентного отношения количества и концентрации частиц по высоте обоих КВОУ ГТУ в процессе эксплуатации.

Рис. 5.9. Внешний вид КВОУ ГТУ Б и В ТЭЦ в САО

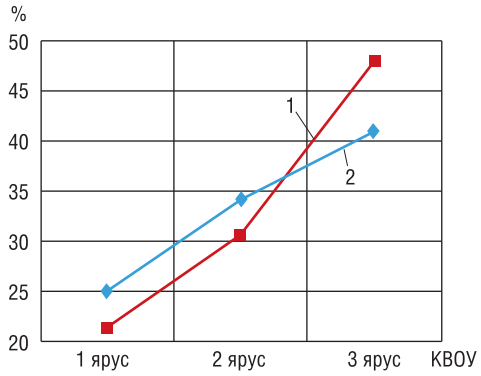
На *рис. 5.10* приведены графики изменения процентного отношения этих параметров по высоте КВОУ Б (*рис. 5.10а*) и КВОУ В (*рис. 5.10б*) [3]. Мониторинг загрязненности воздуха производился одновременно на обоих КВОУ. Из представленных зависимостей видно, что изменение этих параметров по высоте КВОУ Б более пологое, чем на КВОУ В.

Общим для обоих графиков является тенденция роста количества и концентрации частиц по высоте КВОУ, что, на первый взгляд, противоречит общепринятым представлениям о распределении количества и концентрации частиц по высоте забора проб атмосферного воздуха.

Ответ на это «противоречие» дает *рис. 5.11б*, где КВОУ Б и В изображены на конкретном месте установки на ТЭЦ в САО с «розой ветров». Размещение КВОУ В ближе к башенным градирням всего на три метра по сравнению



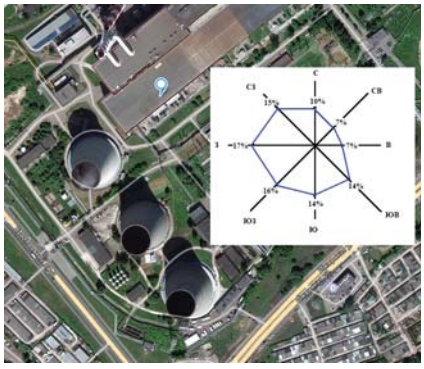
а)



б)

Рис. 5.10. Распределение концентрации (1) и количества (2) частиц в кубометре атмосферного воздуха по ярусам: а) КВОУ Б; б) КВОУ В ТЭЦ в САО

а)



б)

Рис. 5.11. Расположение КВОУ Б и В на ТЭЦ в САО (а) и вид со спутника (б)

с КВОУ Б приводит к более резкому изменению параметров атмосферного воздуха по высоте ВЗТ ГТУ [3].

Пар, выходящий из башенных градирен в южном и юго-западном направлении, оказывает существенное влияние на распределение количества и концентрации взвешенных частиц по всасам КВОУ ГТУ (*рис. 5.12*).

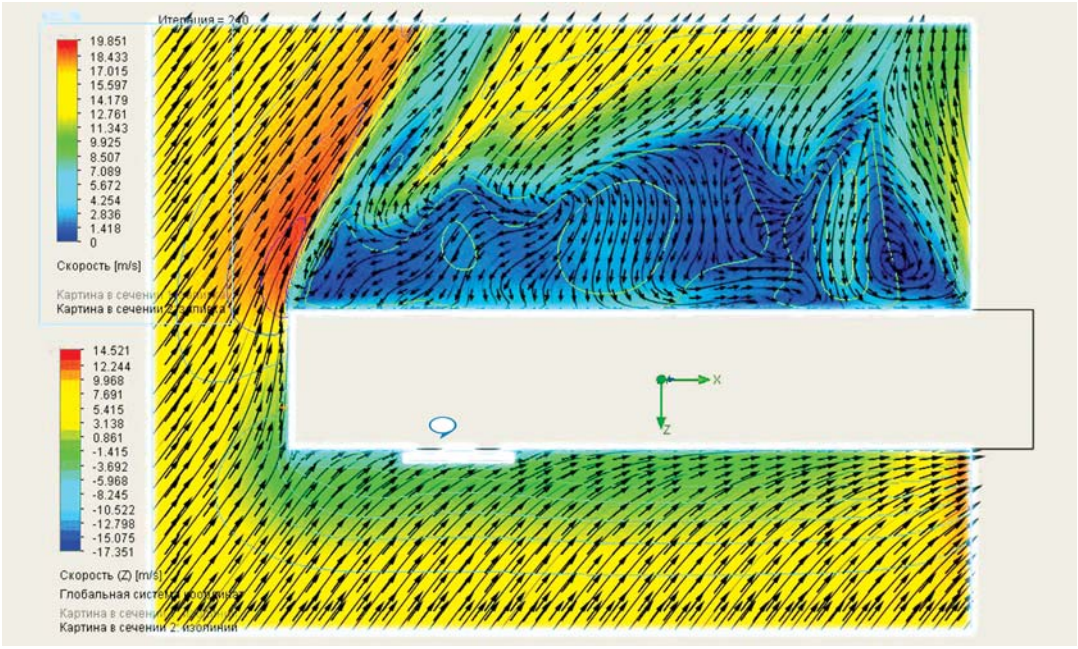


Рис. 5.12. Картина натекания потока воздуха южным направлением ветра на КВОУ при расчетной скорости ветра 12 м/с по программе Solid Works Flow Simulation

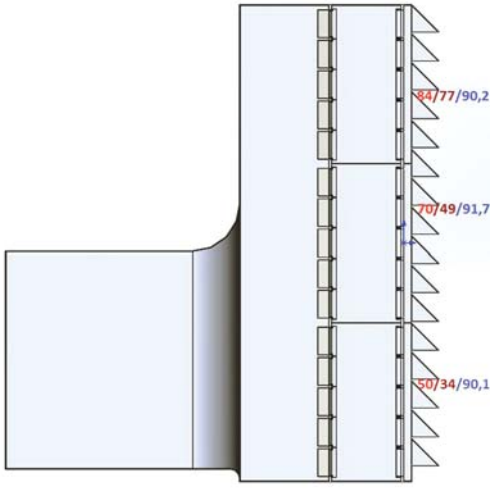


Рис. 5.13. Результаты замеров на КВОУ В ТЭЦ в САО

На *рис. 5.13* представлены результаты замеров абсолютных значений параметров воздуха по высоте КВОУ В. Концентрация частиц (коричневый цвет) в кубометре атмосферного воздуха на всасе третьего яруса КВОУ больше, чем на первом ярусе, в 2,3 раза, количество (красный цвет) – в 1,6 раза. Количество мелкодисперсных частиц практически осталось без изменения (синий цвет) [3].

На *рис. 5.14* приведены сравнительные гистограммы процентного

распределения количества частиц (*рис. 5.14а*) и процентное распределение концентрации частиц в кубометре атмосферного воздуха (*рис. 5.14б*) по ярусам КВОУ Б и В [11].

Как видно из приведенных значений, процентное отношение количества частиц на всасе первого яруса КВОУ Б на 6,7 % больше, чем на этом же уровне на КВОУ В. На втором и третьем ярусе обоих объектов картина меняется на противоположную – на всасе КВОУ В взвешенных частиц больше, чем на КВОУ Б. Сказывается влияние рядом стоящих градирен при Ю и ЮЗ направлениях ветра (*см. рис. 5.11*).

Сравнение процентного отношения концентрации частиц (*рис. 5.14б*) показывает, что эта величина на всасе первого и второго ярусов КВОУ Б больше, чем на этой высоте КВОУ В. На третьем ярусе КВОУ В, наоборот, концентрация частиц выше на 13,5 % по сравнению с этим уровнем КВОУ Б. Таким образом, показано, что каждое, даже рядом стоящее КВОУ, имеет свой фон окружающей среды, на который существенное влияние оказывает собственное оборудование ТЭЦ.

Кроме того, доказано, что расхождение полученных данных с общепризнанным представлением о распределении взвешенных частиц в атмосферном воздухе по высоте забора проб не противоречит природе явления. Различие ре-

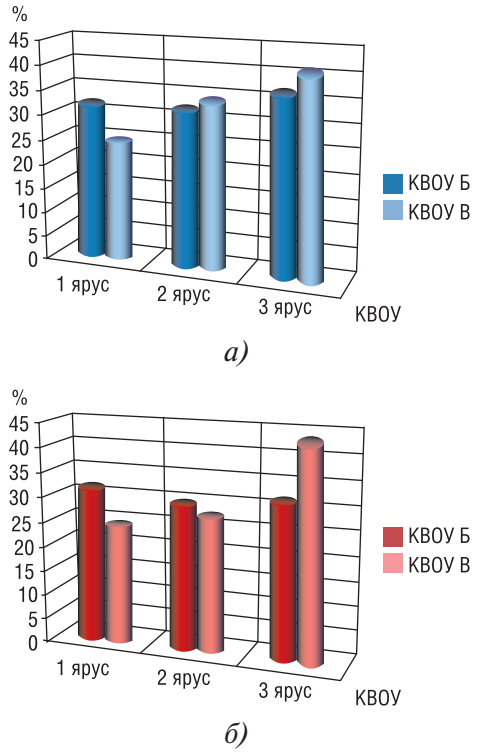


Рис. 5.14. Распределение количества (а) и концентрации (б) по ярусам КВОУ Б и В

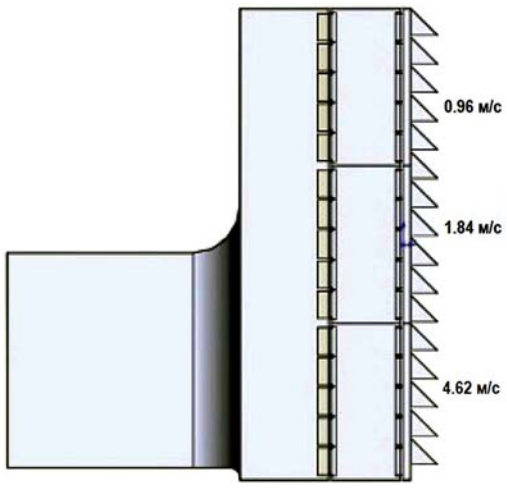


Рис. 5.15. Распределение скорости воздуха на всасе по высоте КВОУ ТЭЦ в САО

зультатов измерений обусловлено только местом и условиями окружающей среды.

На *рис. 5.15* представлены результаты мониторинга скоростей потока циклового воздуха ГТУ на всасе КВОУ ТЭЦ в САО. 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.

Для анализа изменения скорости воздушного потока на всасе и внутри КВОУ, а также в воздуховоде ГТУ был выполнен аэродинамический расчет с помощью программы математического моделирования Solid Works Flow Simulation (*рис. 5.16*). Цветовая визуализация течения воздушного потока, выполненная при математическом моделировании, наглядно показывает полную сходимость результатов расчетов и замеров на КВОУ ГТУ ТЭЦ в САО.

Неоптимальная конструкция ВЗТ ГТУ инициирует неравномерное распределение объема засасываемого атмосферного воздуха по ярусам КВОУ

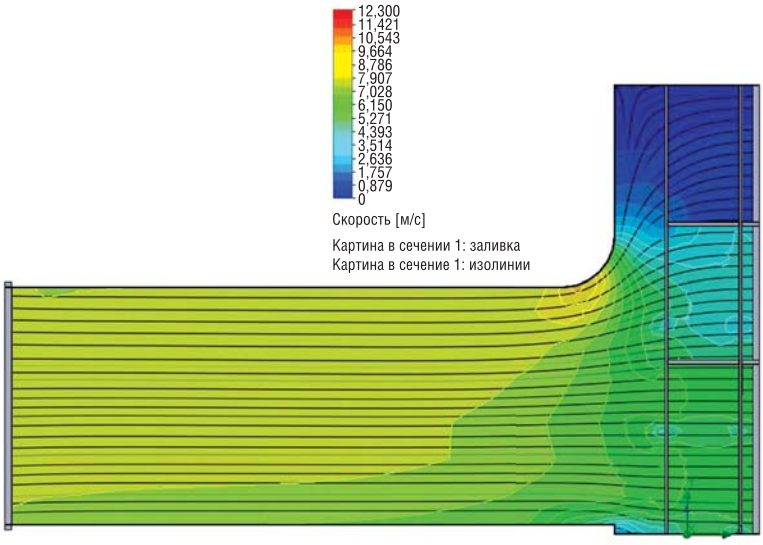
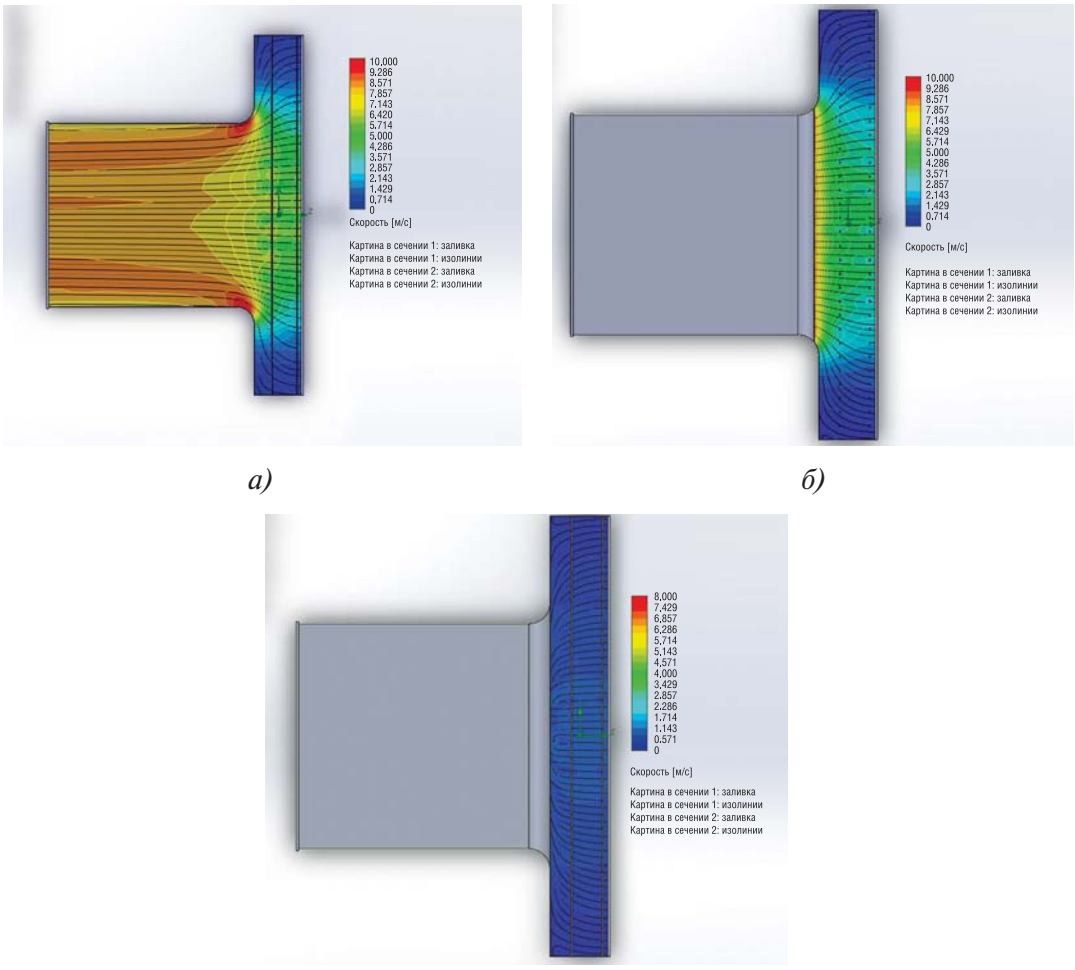


Рис. 5.16. Картина течения воздушного потока по высоте КВОУ ГТУ ТЭЦ в САО



а) *б)*

в)

Рис. 5.17. Поле скоростей потока воздуха в модулях КВОУ ГТУ ТЭЦ в САО (вид сверху):
а) нижний ярус; б) средний ярус; в) верхний ярус

и, следовательно, разную пылевую нагрузку на фильтры. Не менее интересным представляется распределение поля скоростей по ярусам КВОУ в горизонтальной плоскости (*рис. 5.17*).

Поле скоростей воздушного потока в КВОУ и воздуховоде ГТУ в изометрии представлено на *рис. 5.18*.

На всех ярусах КВОУ отмечается наличие застойных зон с низкой или нулевой скоростью потока воздуха по краям модулей (области синего цвета), обусловленных отсутствием подвода воздуховода ГТУ в этих местах. На нижнем ярусе площадь застойных зон меньше, чем на втором КВОУ, что объясняется соосностью этого модуля с воздуховодом ГТУ.

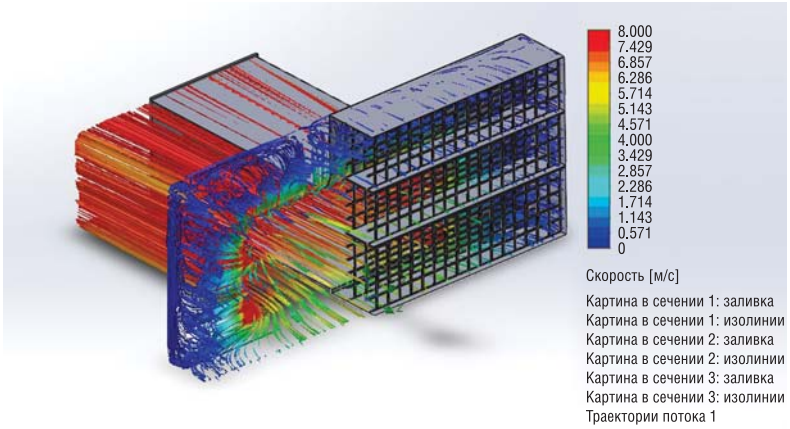


Рис. 5.18. Поле скоростей воздушного потока в КВОУ и воздуховоде ГТУ

На верхнем ярусе КВОУ вся площадь модулей является областью низких скоростей потока воздуха. Наибольшие значения скорости отмечаются в ядре воздушного потока в средней части модулей КВОУ.

5.3. Влияние проектного решения на эксплуатацию рядом стоящих ВЗТ ГТУ с трехсторонним всасом атмосферного воздуха

В состав двух блоков ПГУ-450Т ТЭЦ в МО входят четыре идентичные КВОУ с трехсторонним всасом производства компании Camfil Farr (Швеция), обеспечивающие очистку циклового воздуха ГТУ ГТЭ-160 (ОАО «Силовые машины»). Каждые два КВОУ расположены рядом друг с другом поблочно над машинным залом (*рис. 5.19*).

Рис. 5.19. КВОУ № 31 и 32 энергоблока № 3 и КВОУ № 41 и 42 энергоблока № 4 ТЭЦ в МО

Расстояние между этими КВОУ 108 метров, а дистанция между осями двух рядом стоящих устройств одного энергоблока равна 24 метрам. Площадь входного сечения центрального всаса в три раза превышает данный параметр каждого бокового всаса КВОУ. Поэтому количество фильтров, установленных на ступенях фильтрации центрального всаса, находится в таком же пропорциональном отношении к фильтрам на боковых всасах КВОУ.

Территориально ТЭЦ расположена на северной границе Москвы и Московской области. В соответствии с многолетними наблюдениями ГУ «Московский ЦГМС-Р», превалирующими направлениями ветров для данной местности являются юго-западное (вероятность 20 %), незначительно меньше южное (17 %) и западное (16 %). Однако юго-западные и западные ветра не направлены на всас КВОУ ГТУ. На *рис. 5.20* представлено фото блоков ПГУ ТЭЦ в МО со спутника с нанесенной «розой ветров» [4].

В процессе обследования ТЭЦ в МО были выявлены следующие источники загрязнения окружающей среды:

– жилая зона и строительство новых домов в Мытищинском районе Московской области, а также зеленые насаждения перед КВОУ ГТУ;

– бетонно-раздаточный узел ООО «Виктория»;

– Волковское шоссе;

– выбросы собственного оборудования ТЭЦ.

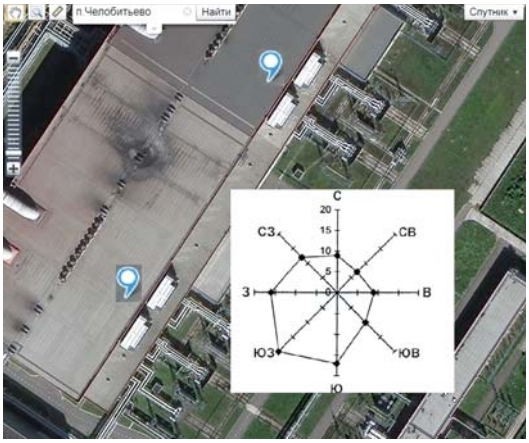


Рис. 5.20. Фото со спутника энергоблоков ПГУ ТЭЦ в МО

Для всестороннего анализа работы КВОУ определялись поля скоростей потоков воздуха на их всасах. Скорости потока циклового воздуха на всасе КВОУ замерялись переносным анемометром Airflow Instruments Model TA465 (Великобритания). По нескольким замерам в каждой точке измерения определялась средняя величина скорости потока.

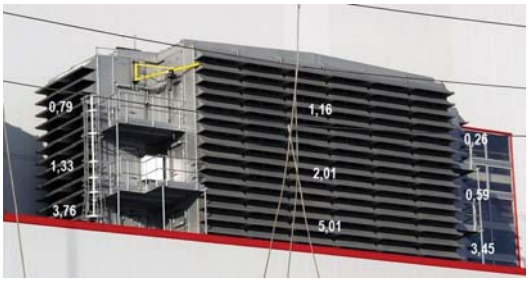


Рис. 5.21. Результаты замеров скорости на всасе КВОУ

На *рис. 5.21* представлены результаты замеров скорости на КВОУ № 32 [4]. Поскольку кон-

струкция всех четырех КВОУ идентична, результаты замеров скорости на всасе каждого устройства аналогичны. Наибольшая скорость потока воздуха отмечена на всасах нижнего яруса КВОУ. При оптимальной скорости воздушного потока на всасе до 1 м/с, на нижнем ярусе центрального всаса КВОУ скорость превысила 5 м/с, а на боковых всасах – 3 м/с. На втором ярусе центрального всаса КВОУ скорость потока в 2,5 раза ниже, а на третьем (верхнем) в 4,3 раза, чем на нижнем. Аналогичная тенденция отмечается и на боковых всасах КВОУ. Уменьшение скорости потока по высоте КВОУ обусловлено особенностью конструкции воздухозаборного тракта.

При совпадении оси установки фильтров нижнего яруса и горизонтальной части воздуховода скорость потока на всасе КВОУ выше, чем на других ярусах, где соосность отсутствует.

Для анализа изменения скорости воздушного потока на всасе и внутри КВОУ, а также в воздуховоде ГТУ был выполнен аэродинамический расчет с помощью программы математического моделирования Solid Works Flow Simulation (*рис. 5.22*). Цветовая визуализация течения воздушного потока наглядно показывает полную сходимость результатов расчетов и замеров на КВОУ ГТУ ТЭЦ в МО.

Как и в случае с КВОУ ТЭЦ в САО, неоптимальная конструкция ВЗТ ГТУ инициирует неравномерное распределение объема засасываемого атмосферного воздуха по ярусам КВОУ и, следовательно, разную пылевую нагрузку на фильтры. На *рис. 5.23* представлено распределение поля скоростей по ярусам КВОУ в горизонтальной плоскости.

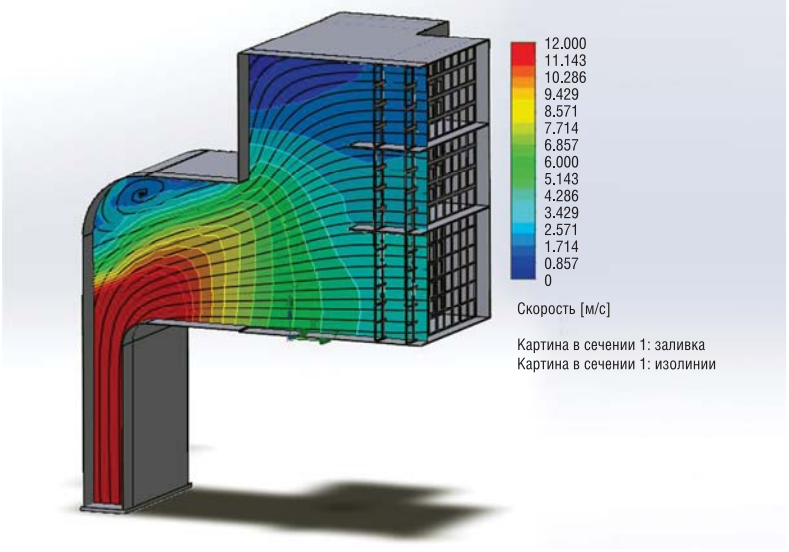
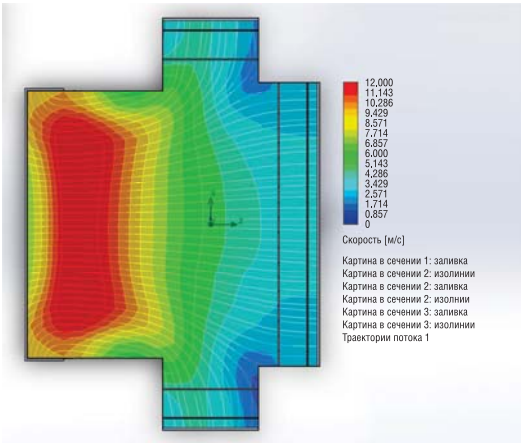
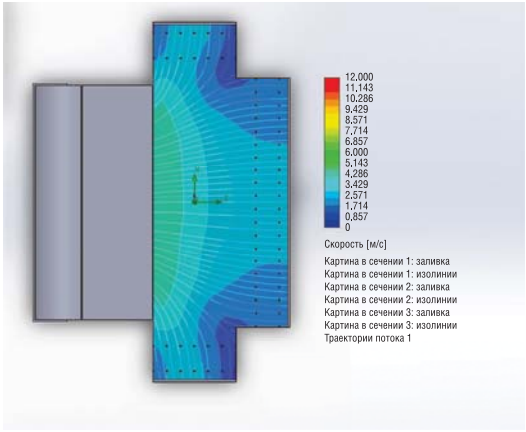


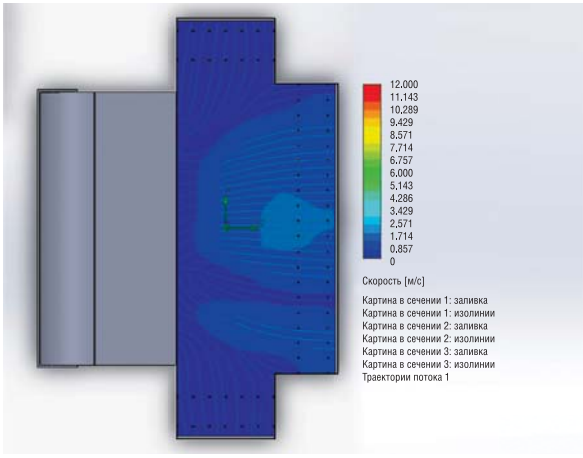
Рис. 5.22. Картина течения воздушного потока по высоте КВОУ ГТУ ТЭЦ



а)



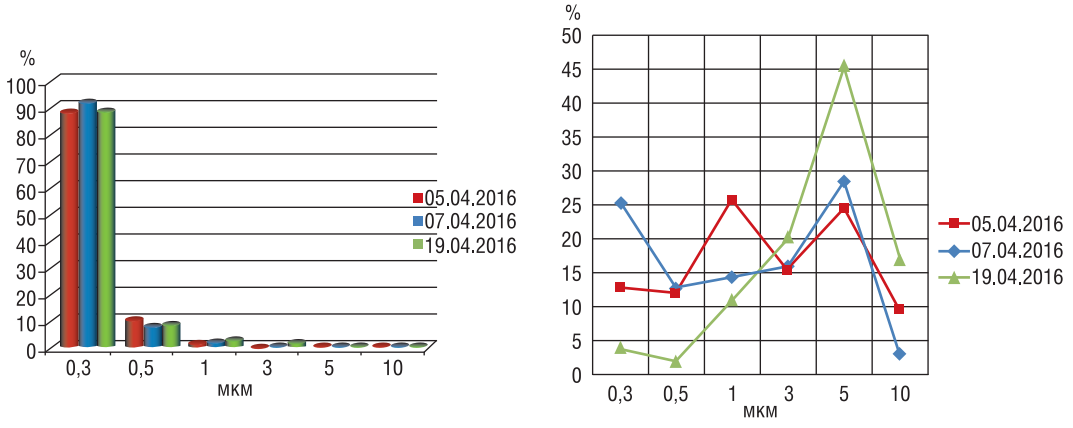
б)



в)

Рис. 5.23. Поле скоростей потока воздуха в модулях КВОУ ГТУ ТЭЦ в МО (вид сверху):
а) нижний ярус; б) средний ярус; в) верхний ярус

Как и на ВЗТ с односторонним всасом, на всех ярусах КВОУ ТЭЦ в МО отмечается наличие застойных зон с низкой или нулевой скоростью потока воздуха по краям модулей (области синего цвета), обусловленных отсутствием воздуховода ГТУ в этих местах. На нижнем ярусе площадь застойных зон меньше, чем на втором КВОУ, что объясняется соосностью этого модуля с воздуховодом ГТУ. На верхнем ярусе КВОУ вся площадь модулей является областью низких скоростей потока воздуха. Однако у КВОУ с трехсторонним всасом поле скоростей более равномерное, чем у устройств с односторонним всасом (*см. рис. 5.17* и *5.23*).



а) *б)*

Рис. 5.24. Процентное распределение частиц в кубометре атмосферного воздуха по дисперсности:
а) количество; б) концентрация

При мониторинге окружающей среды на всасе КВОУ ТЭЦ в МО анализировалось процентное распределение количества и концентрации частиц по их дисперсности. На *рис. 5.24* представлены результаты замеров, выполненных на всасе КВОУ № 42 в течение нескольких дней апреля 2016 года [4].

Как видно из *рис. 5.24а*, наибольшее количество (более 88 %) взвешенных частиц имели размер 0,3 мкм. Второе место занимали частицы размером 0,5 мкм. В совокупности они составляли 97 %, что говорит о подавляющем большинстве мелкодисперсных частиц на всасе КВОУ ГТУ.

На *рис. 5.24б* приведено процентное распределение концентрации частиц по дисперсности. Наибольшая концентрация частиц размером 0,3 мкм была зафиксирована 7 апреля, а наименьшая – 19 апреля 2016 года. Особо следует отметить, что концентрация этих частиц в течение нескольких дней менялась в диапазоне от 2 до 6 раз.

Максимальный экстремум концентрации (более 45 %) отмечен для частиц размером 5 мкм. Интересно, что зависимости 05.04.2016 и 07.04.2016 имеют два примерно одинаковых максимальных экстремума, но для разных дисперсностей, в то время как зависимость от 19.04.2016 только один. При этом все три зависимости отмечены пиком величин для частиц дисперсностью 5 мкм.

Интересной представляется динамика изменения этих величин в зависимости от температуры наружного воздуха и осадков. Пятого апреля во время замеров температура воздуха была –1 °С, при этом осадки

в виде дождя или снега отсутствовали. Седьмого апреля температура воздуха повысилась до +4 °С, однако взятие анализов воздуха сопровождалось дождевой моросью. 19 апреля потеплело до +10 °С, атмосферных осадков не было.

С повышением температуры окружающей среды почва начала просыхать более интенсивно, что увеличило концентрацию крупнодисперсных частиц 5 мкм на высоте всаса КВОУ. Это хорошо видно на *рис. 5.24б*, где зафиксированы пики концентрации этой дисперсности в строгом соответствии с температурой наружного воздуха. Взвешенная морось, представляющая собой мелкодисперсные аэрозоли, 7 апреля привела к росту концентрации частиц размером 0,3 мкм по сравнению с другими днями.

Анализируя *рис. 5.24*, приходим к выводу, что, несмотря на высокую концентрацию частиц размером 5 мкм, их количество не превышало 0,15 % даже 19 апреля. Следовательно, их влияние на загрязнение воздушных фильтров КВОУ незначительно. В то же время мелкодисперсные частицы размером 0,3 мкм с 25,4 % концентрации и 91,7 % количества в атмосферном воздухе на всасе КВОУ существенно влияют на срок службы воздушных фильтров.

На 3D-модели КВОУ (со специально выделенными тремя ярусами) приведены результаты замеров количества, концентрации и процентного содержания мелкодисперсных частиц по всем всасам и ярусам КВОУ № 32, выполненных 06.09.2016 года при работающей ГТУ (*рис. 5.25*) [4]. Как видно из представленных данных, на центральном всасе КВОУ значения перечисленных параметров, за исключением мелкодисперсных частиц, уменьшались по высоте забора проб. При этом процентное содержание мелкодисперсных частиц размером 0,3 мкм увеличивалось по высоте КВОУ. Другими словами, подтверждалось общепризнанное представление о распределении взвешенных частиц в атмосферном воздухе по высоте забора проб: чем выше от поверхности земли, тем меньшее количество и концентрация частиц, тем чище атмосферный воздух, что характеризует направленный вверх вектор изменения параметров.

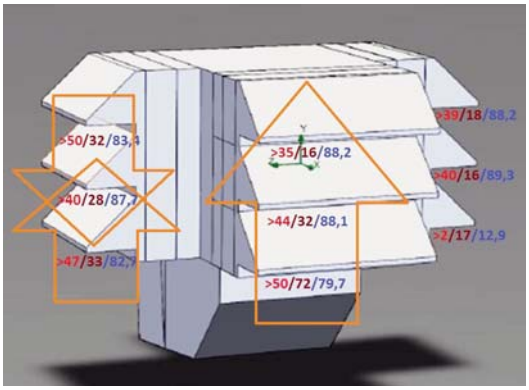


Рис. 5.25. Результаты замеров параметров атмосферного воздуха на КВОУ № 32: количество частиц млн/м³ (красный цвет), концентрация частиц мг/м³ (коричневый цвет); содержание мелкодисперсных частиц 0,3 мкм/м³ в процентах (синий цвет)

В отличие от центральной части КВОУ на его боковых всасах изменение рассматриваемых параметров атмосферного воздуха не отличается однотипностью. Так, на левом всасе наибольшее количество частиц зафиксировано на третьем (верхнем) ярусе КВОУ, а наибольшая концентрация на первом (нижнем) ярусе. Наименьшие значения этих величин зафиксированы на втором ярусе. При этом процентное содержание мелкодисперсных частиц наибольшее.

а)

б)

Рис. 5.26. Завихрение снега:
а) на погодных козырьках КВОУ;
б) у основания КВОУ

Таким образом, имеется так называемый разнонаправленный вектор (навстречу друг другу) изменения параметров на нижнем и верхнем ярусе КВОУ.

На правом всасе картина изменения параметров отличается от ранее исследованных частей КВОУ. Наибольшее количество частиц и их мелкодисперсной фракции зафиксировано на втором ярусе, а концентрация частиц – на верхнем. Причем наименьшее количество частиц и их фракции размером 0,3 мкм определено на всасе первого яруса КВОУ. Особое внимание вызывает необычно малое значение количества взвешенных частиц (в 23–25 раз) и мелкодисперсной фракции (более чем в 6 раз) по сравнению с нижними ярусами других всасов КВОУ.

Для выяснения причин такого явления необходимо обратиться к «розе ветров» (*см. рис. 5.20*). При южном направлении ветра поток воздуха поступает на КВОУ под углом 35–40°. В результате этого за правым всасом КВОУ образуется завихрение потока воздуха и зона разрежения. Подтверждение и иллюстрация этого явления были получены нами во время

фото- и видеосъемки КВОУ в декабре 2016 года. Визуализатором течения воздушного потока атмосферного воздуха являлся выпавший снег (*рис. 5.26*) [4].

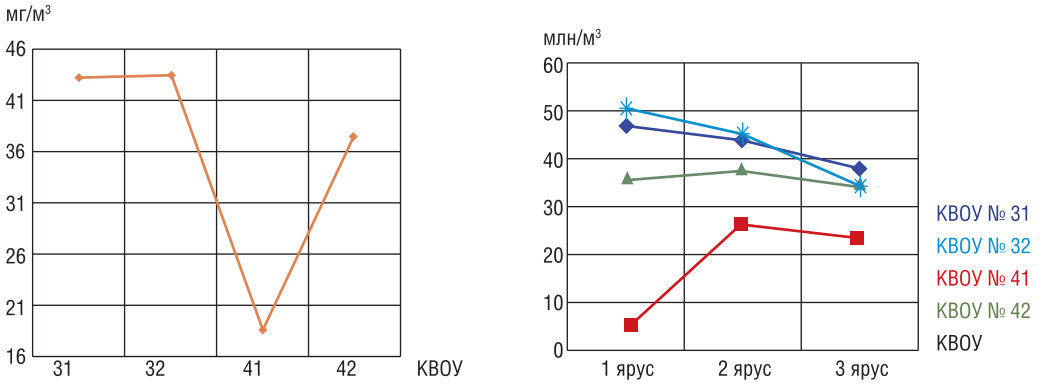
На *рис. 5.26а* зафиксировано отложение снега на погодных козырьках правого всаса КВОУ и стрелками показано направления воздушного потока, полученного во время видеосъемки. Как видно на представленной фотографии, скопление снега сдвинуто потоком воздуха от края к середине погодных козырьков, что подтверждает завихрение потока по высоте правого всаса КВОУ.

На *рис. 5.26б* изображена нижняя часть правого всаса КВОУ. Снег на погодных козырьках нижнего яруса практически отсутствует. Также он отсутствует и у основания правого всаса КВОУ, что полностью согласуется с картиной перемещения снега на погодных козырьках (*см. рис. 5.26а*). На *рис. 5.26б* синей стрелкой обозначено направление течения (завихрение) потока воздуха зафиксированное в процессе видеосъемки. Таким образом, при южном направлении ветра на правом всасе возникает завихрение потока воздуха, в результате чего у основания КВОУ образуется зона разрежения с низким количеством частиц и содержанием их мелкодисперсной фракции 0,3 мкм. При северном направлении ветра наблюдается поступление облака цементной пыли на всас воздухозаборного тракта ГТУ от бетонно-раздаточного узла, расположенного за блоком ПГУ на крайней оконечности КВОУ № 42.

Интересным представляется определение тенденции изменения параметров атмосферного воздуха на всасах КВОУ ТЭЦ в МО. Как отмечалось ранее, площадь входного сечения центральных воздухозаборов КВОУ в три раза больше площади каждого из боковых всасов. На этом основании было решено сравнивать КВОУ по центральным всасам. Измерение параметров атмосферного воздуха на всех четырех КВОУ выполнялось при работающих ГТУ.

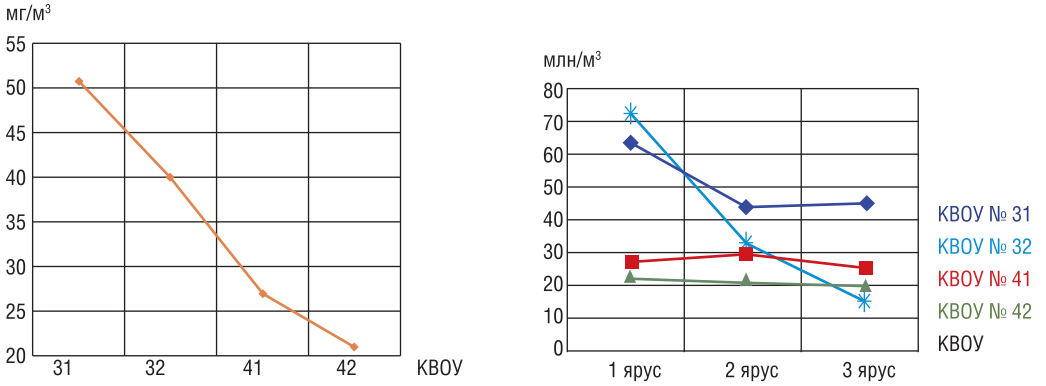
На *рис. 5.27* приведено распределение среднего и дискретного количества частиц в кубометре атмосферного воздуха по центральным всасам и их ярусам всех КВОУ ТЭЦ в МО [4].

На *рис. 5.27а* видно, что среднее количество частиц на центральных всасах КВОУ № 31 и № 32 практически одинаково. На КВОУ № 41 эта величина меньше по сравнению с другими устройствами более чем в два раза. На КВОУ № 42 среднее количество частиц не превысило значений на КВОУ № 31 и № 32, несмотря на то что во время мониторинга загрязненности атмосферного воздуха именно перед этим устройством велись земляные работы. Распределение количества частиц по ярусам центральных всасов КВОУ показывает, что первые два



а) *б)*

Рис. 5.27. Распределение количества частиц в кубометре атмосферного воздуха: а) перед КВОУ; б) по ярусам КВОУ



а) *б)*

Рис. 5.28. Распределение концентрации частиц в кубометре атмосферного воздуха: а) по всасам; б) по ярусам КВОУ

Рис. 5.29. Линии тока основного потока и подветренного вихря

устройства имеют линейные зависимости, характеризующие снижение данного параметра по высоте взятия проб. На КВОУ № 41 и № 42 наибольшее количество частиц в кубометре атмосферного воздуха зафиксировано на втором ярусе. Как видно, максимальный экстремум на втором ярусе КВОУ № 41 выражен более ярко, чем на КВОУ № 42. При этом количество взвешенных частиц перед КВОУ

№ 42 больше, чем на рядом стоящем КВОУ № 41, но оно распределяется более равномерно по высоте воздухозабора.

На *рис. 5.28а* приведена зависимость изменения концентрации взвешенных частиц в атмосферном воздухе (мг/м^3) на центральных всасах КВОУ ТЭЦ в МО. Эта зависимость имеет практически линейную зависимость от расположения КВОУ. Наибольшая концентрация частиц зафиксирована на всасе КВОУ № 31, а наименьшая на КВОУ № 42. Такая зависимость обусловлена южным направлением ветра, поступающего со стороны КВОУ № 31 [4]. Распределение концентрации взвешенных частиц в атмосферном воздухе по высоте КВОУ ТЭЦ в МО представлено на *рис. 5.28б*.

Наибольшая концентрация, как и количество частиц (*рис. 5.28б*), зафиксированы на рядом стоящих КВОУ № 31 и № 32. Все кривые имеют излом на втором ярусе КВОУ, что характеризует изменение тенденции распределения концентрации частиц по высоте. На третьем ярусе КВОУ № 31 концентрация частиц выше, чем на втором ярусе, на остальных – меньше. Это явление обусловлено наиболее близким расположением данного устройства к краю здания, откуда поступает южный ветер, приносящий потоки воздуха с большим количеством и концентрацией взвешенных частиц. По мере продвижения потока воздуха вдоль фронта КВОУ количество и концентрация частиц уменьшаются. Вихревые по-

а)

б)

Рис. 5.30. Формирование подветренным вихрем снежного заноса:
а) перед КВОУ;
б) на фильтрах первой ступени

токи воздуха, образующиеся у рядом стоящих КВОУ, влияют на распределение взвешенных частиц по высоте воздухозаборных трактов.

Вихревые потоки могут образовываться и у отдельно стоящих КВОУ ГТУ. На *рис. 5.29* приведен пример образования подветренного вихря перед всасом ВЗТ энергетической ГТУ на ТЭЦ-2 в ЮАО. Синими линиями показаны линии тока подветренного вихря и поступления снега на всас КВОУ. Натекающий поток атмосферного воздуха, встречая на своем пути преграду на площадке КВОУ и обтекая ее, образует подветренный вихрь. В результате этого часть атмосферных осадки в виде снега направляется к основанию ограждения, а другая часть, огибая его, поступает на всас КВОУ ГТУ. Отложения снега на площадке перед КВОУ ГТУ фактически являются визуализаторами этого процесса.

Как показывает опыт эксплуатации, даже незначительное препятствие на площадке размещения КВОУ (не учтенное проектантами и поставщиками ВЗТ) может оказывать существенное влияние на формирование отложений снежного покрова перед ВЗТ ГТУ. На *рис. 5.30а* зафиксирован сугроб высотой более 1,5 м перед КВОУ ГТУ.

В результате этого происходит деформация поля скоростей на всасе КВОУ, интенсивное поступление снега на фильтры первой ступени, рост перепада давления на них, снижение выработки мощности энергетической ГТУ (*рис. 5.30б*).

5.4. Влияние конструкции ВЗТ ГТУ на систему фильтрации воздуха в КВОУ

Для оптимальной работы фильтров (на расчетных значениях расхода воздуха и скоростей) в системе очистки циклового воздуха ГТУ необходимо ***равномерное распределение скоростей воздуха на всасе КВОУ по его высоте.*** С целью проверки этого требования в *§ 5.2* и *5.3* были выполнены замеры скорости воздуха по высоте КВОУ разной конструкции воздухозаборных трактов (с односторонним и трехсторонним всасом) на ТЭЦ в САО и МО. Кроме того, был осуществлен аэродинамический расчет течений воздушного потока в этих КВОУ и воздуховодах с помощью программы математического моделирования Solid Works Flow Simulation. Результаты замеров скорости воздушного потока на всасе действующего ВЗТ энергетических ГТУ и аэродинамического расчета показали свою идентичность и точность.

В результате замеров и расчетов было установлено, что равномерность воздушного потока на всасе КВОУ энергетических ГТУ отсутствует. Следует отметить, что на ТЭЦ в САО и МО установлены ГТЭ-160 одина-

ковой мощности. Аналогичной энергетической установкой оснащена и ТЭЦ в ЗАО.

Проанализируем особенности воздухозаборных трактов ГТУ этих ТЭЦ. В отличие от ТЭЦ в САО и ЗАО, КВОУ воздухозаборного тракта в МО имеет трехсторонний всас. Московские ТЭЦ с ГТЭ-160 оснащены КВОУ с односторонним всасом. Расход воздуха в осевой компрессор ГТУ на ТЭЦ в САО ниже, чем в других турбомашинах. Это обусловлено особенностями проектирования воздуховода ВЗТ в машинном зале ТЭЦ САО. Подкрановые пути и опоры в машинном зале энергоблока не позволили расширить конфузор воздуховода ГТУ (*рис. 5.31*).

Рис. 5.31. Подкрановые пути и опоры в машинном зале

Из-за уменьшения расхода воздуха через осевой компрессор ГТУ количество фильтров в КВОУ было сокращено по сравнению с другим ВЗТ. В *табл. 5.2* представлены основные характеристики рассматриваемых ВЗТ ГТЭ-160. Фильтры во всех КВОУ ГТУ имели одинаковый расчетный расход воздуха 3400 м^3/ч (0,944 м^3/с).

Характеристики ВЗТ ГТЭ-160 ***Таблица 5.2***

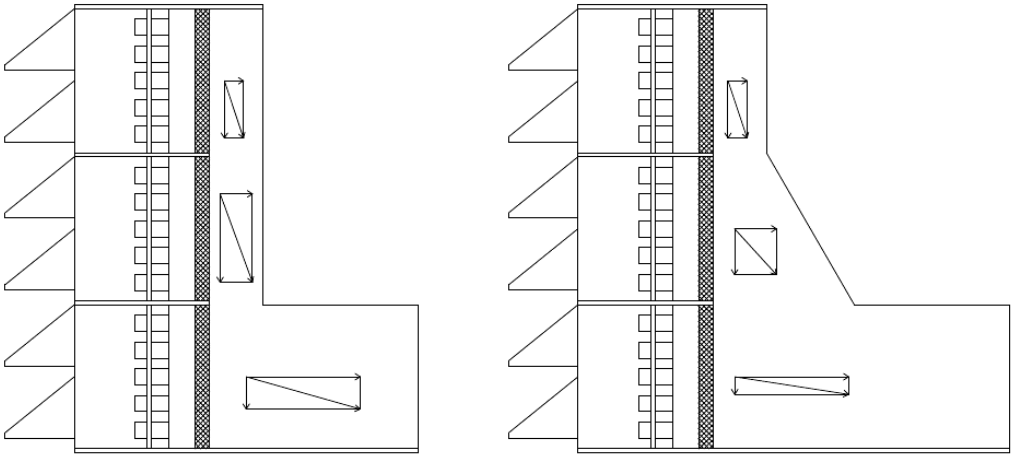
ТЭЦ	Расход воздуха ВЗТ, м^3/с	Кол-во фильтров в КВОУ, шт.	Расход воздуха фильтра, м^3/с	Скорость воздуха всас КВОУ, м/с
ЗАО	428	480	0,89	2,92
САО	395	390	1,02	4,62
МО	428	420	1,02	4,07*

**средняя скорость потока по трем всасам КВОУ*

Из *табл. 5.2* видно, что, несмотря на разный расход воздуха ГТУ и количества фильтров в КВОУ, расход воздуха через фильтр-элементы практически соответствует расчетному значению 0,944 м^3/с. При этом значения скоростей потока воздуха на первом ярусе КВОУ резко отличаются. Такая же картина трансформации поля скоростей потока воздуха зафиксирована и по высоте КВОУ ГТУ (*см. рис. 5.15* и *5.21*).

Чем же обусловлена такая картина распределения скорости воздушного потока на всасе КВОУ ГТЭ-160? Опираясь на результаты выполненных замеров и аэродинамических расчетов, проанализируем схемы

течения воздушного потока в рассматриваемых КВОУ энергетических ГТУ с точки зрения оптимальной очистки системы фильтрации воздуха. Дадим обозначение схемам этих ВЗТ в зависимости от угла соединения КВОУ и воздуховода за ними: А (САО и МО) и Б (ЗАО). На *рис. 5.32* представлены обозначения векторов скоростей и углов поворота потока, эпюра скоростей по высоте КВОУ ГТУ.



а) *б)*

Рис. 5.32. Схемы ВЗТ ГТУ: а) в САО и МО; б) в ЗАО

Уменьшение скорости потока по высоте КВОУ, обусловлено неоптимальной конструкцией воздухозаборного тракта ГТУ типа А (угол соединения КВОУ и воздуховода 90°). 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 этого скорость потока на нижнем ярусе в 4,8 раза превышает скорость на верхнем ярусе КВОУ ГТУ на САО (*см. рис. 5.15*). Поскольку воздуховод ВЗТ на ТЭЦ в САО заужен, там зафиксировано наибольшее значение скорости потока на первом ярусе КВОУ ГТУ, чем на КВОУ в МО. На *рис. 5.33* представлены обозначения векторов скоростей и углов поворота потока, эпюра скоростей по высоте КВОУ ГТУ.

α	А	Б	В
3 ярус	71°33'	71°33'	63°58'
2 ярус	69°56'	47°38'	28°51'
1 ярус	15°49'	8°48'	6°19'

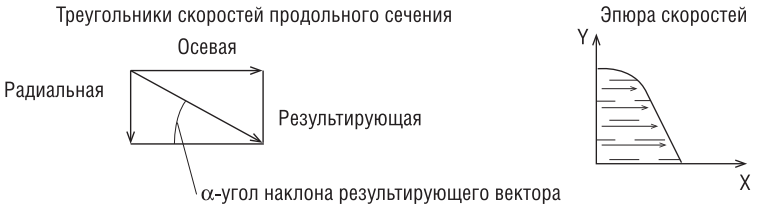


Рис. 5.33. Обозначения векторов скоростей и углов поворота потока, эпюра скоростей по высоте КВОУ ГТУ

Из представленных данных видно, что скорости потока за фильтрами КВОУ А и Б на верхних ярусах имеют наименьшую осевую составляющую по сравнению с другими ярусами, а угол поворота потока (вектор результирующей скорости) в воздуховоде также 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, создаёт в сужающемся сечении пониженное давление одного потока, что вызывает подсос в этот поток воздуха в вертикальном канале, который затем уносится от места всаса энергией первого потока.

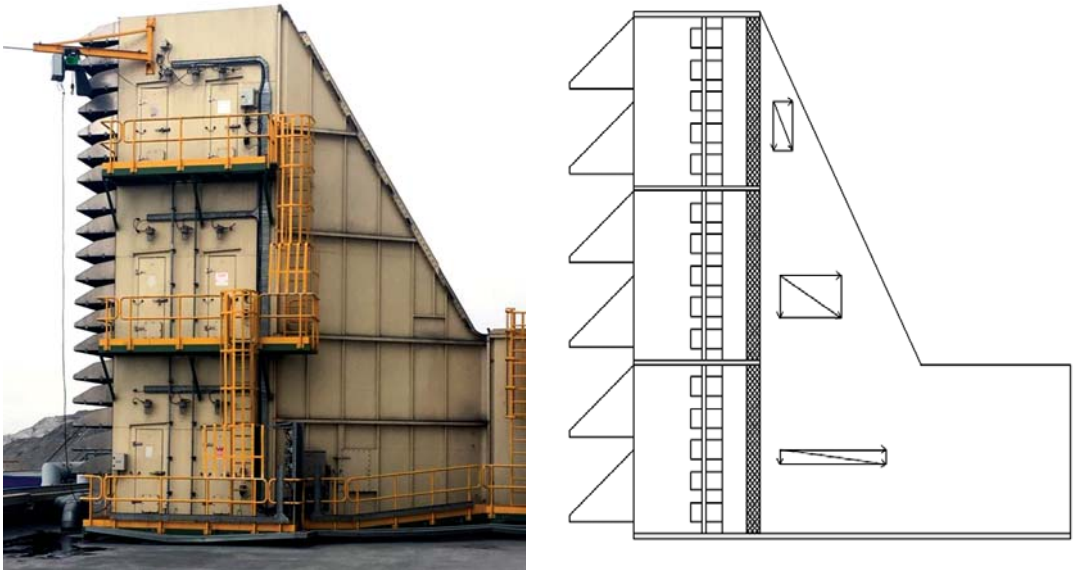
При более плавном (не под 90°) переходе от КВОУ Б к воздуховоду ГТУ на верхних ярусах картина течения воздушного потока за фильтрами меняется: осевые скорости возрастают, угол поворота потока результирующего вектора скорости на 24° меньше, чем на КВОУ А на втором ярусе, а следовательно, меньше и потери.

Из сказанного следует, что чем выше КВОУ и чем ниже расположен воздуховод к ГТУ, тем больше потери в воздухозаборном тракте и тем меньше скорости потока на всасе верхних ярусов. Такие конструкции ВЗТ ГТУ инициируют неравномерное распределение объема засасываемого атмосферного воздуха по ярусам КВОУ и, следовательно, разную пылевую нагрузку на фильтры.

В качестве альтернативы рассмотренным схемам КВОУ А и Б проанализируем также реально существующее КВОУ В на Челябинской ТЭЦ-4 и схему течения воздушного потока в воздуховоде (*рис. 5.34*).

Показатели течения потока воздуха в воздуховоде за этим КВОУ говорят сами за себя (*см. рис. 5.33*). Из рассмотренных схем только КВОУ В обеспечивает более равномерное распределение скорости воздушного потока по высоте на всасе ВЗТ. Следует заметить, что все сказанное корректно при одинаковых климатических условиях для рассмотренных КВОУ энергетических ГТУ.

Таким образом, мы выяснили, как конструктивные решения КВОУ и воздуховода ГТУ влияют на скорости потока на входе в воздушные фильтры. Повышенные, неоптимальные по сравнению с расчетными (проектными) скорости воздушного потока на входе в воздушные фильтры приносят с собой большое количество загрязняющих веществ,



а) *б)*

Рис. 5.34. КВОУ В:
а) воздуховод на уровне верхнего яруса КВОУ;
б) схема КВОУ и воздуховода с треугольниками скоростей после фильтров

что негативно сказывается на их жизненном цикле. Перепад давления на фильтрах нижних ярусов может возрасти до предельно-допустимых значений, в то время как фильтры верхних ярусов КВОУ будут недогружены. Иначе говоря, 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, можно с помощью датчиков перепада давления, установленных за фильтрами на каждом ярусе и ярусе КВОУ ГТУ (*§ 4.6*).

Нивелировать влияние аэродинамически неоптимального соединения КВОУ и воздуховода ГТУ в процессе эксплуатации можно с помощью воздушных фильтров, спроектированных на расчетный расход воздуха 4250, а не 3400 м^3/ч. Эта замена позволить увеличить расход воздуха через новые фильтры на 25 %, приблизить расчетные скорости потока к фактическим в КВОУ и тем самым продлить жизненный цикл систем очистки циклового воздуха энергетической ГТУ.

При проектировании ВЗТ необходимо добиваться плавного подвода воздуха от КВОУ к воздуховоду ГТУ и увеличения количества фильтров в КВОУ. Так, количество фильтров в КВОУ Б в ЗАО было увеличено на 14,3 % по сравнению с КВОУ А в МО и достигнут более плавный переход от КВОУ к воздуховоду.

5.5. Здравый смысл проектных решений по снижению рисков загрязнения систем фильтрации ВЗТ энергетических ГТУ оборудованием энергоблоков ПГУ

Многолетний опыт эксплуатации и обследований отечественных блоков ПГУ показал появление на воздушных фильтрах очистки циклового воздуха ГТУ и на «чистой» стороне КВОУ (за финишными фильтрами) маслянистых отложений (*рис. 5.35*).

а) *б)*

в) *г)*

Рис. 5.35. Маслянистые отложения:
а) на панельном фильтре; б) на кассетном фильтре;
в) за финишными фильтрами; г) на «чистой» стороне КВОУ

Проанализируем возможные источники загрязнения воздушных фильтров КВОУ энергетических ГТУ масляными парами. Прежде всего обратимся к особенностям проектирования блоков ПГУ на отечественных ТЭЦ. Типичное размещение оборудования на энергоблоке ПГУ ТЭЦ представлено на *рис. 5.36.*

Рис. 5.36. КВОУ ГТУ и силовые трансформаторы энергоблока ПГУ

Перед КВОУ энергетических ГТУ установлены трансформаторы выдачи электрической мощности и трансформаторы собственных нужд. В каждом трансформаторе есть масло. На отечественных ТЭЦ обычно применяется трансформаторное масло марки ГК. Это высококачественное специальное изоляционное масло, вырабатываемое гидрокрекингом на основе минерального масла с незначительным содержанием серы, содержащее 0,25–0,40 % масс. ингибитора окисления. Оно отличается длительным сроком службы и неагрессивно по отношению к большинству изолирующих материалов.

Оценим, какой объем масла может находиться в трансформаторах. Возьмем для примера тольяттинский трансформатор выдачи мощности ТДЦ-200000/220 и трансформатор собственных нужд ТРДНС-25000/15,

которыми обычно оснащены энергоблоки ПГУ на базе отечественных ГТЭ-160. Полный объем масла в ТДЦ-200000/220 – 39 тонн, а в ТРДНС-25000/15 – 15 тонн. Энергоблок, состоящий из двух ГТУ и одной паровой турбины, комплектуется тремя силовыми трансформаторами и двумя собственных нужд. Таким образом, общее количество масла во всех трансформаторах примерно 147 тонн. Возможные протечки масла контролируются ежедневным визуальным осмотром. Случаи отложения трансформаторного масла на поверхностях силовых трансформаторов в районе маслобака фиксируются персоналом, осуществляющим обходы и осмотры оборудования (*рис. 5.37*).

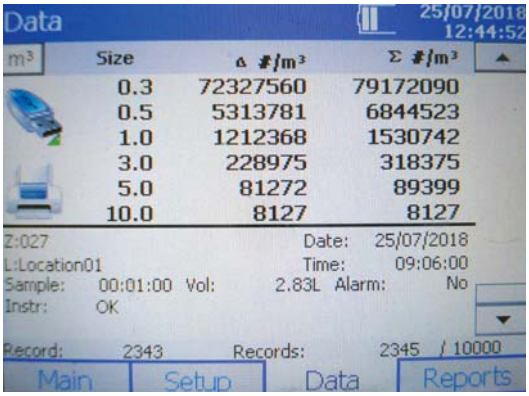
Рис. 5.37. Масло на поверхности силового трансформатора под маслобаком

Другим потенциальным источником поступления паров масла на всас КВОУ ГТУ являются выпары турбомашин, установленные на крыше машинного зала (*рис. 5.38а*). На *рис. 5.38б* изображен эксгаустер и приспособления (в виде ведер) для предотвращения выброса масляных паров в атмосферу на одной из старейших ГРЭС в Электрогорске.

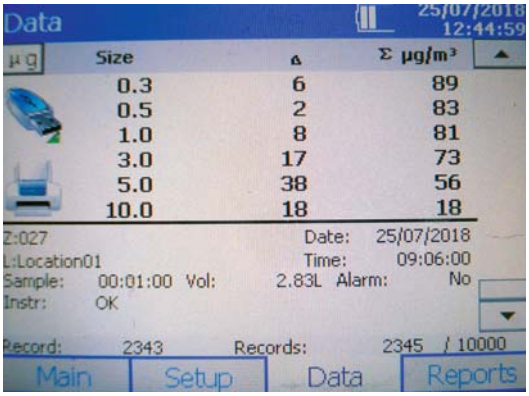
а)

б)

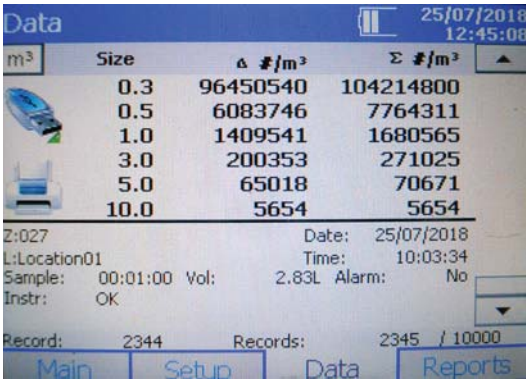
Рис. 5.38. Выпары на крыше машинного зала: а) дренажей турбомашин; б) эксгаустер



а)

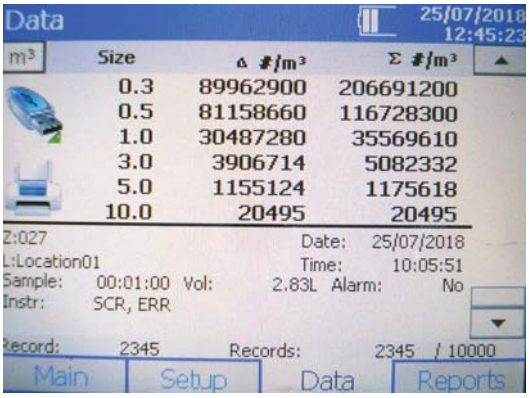


б)

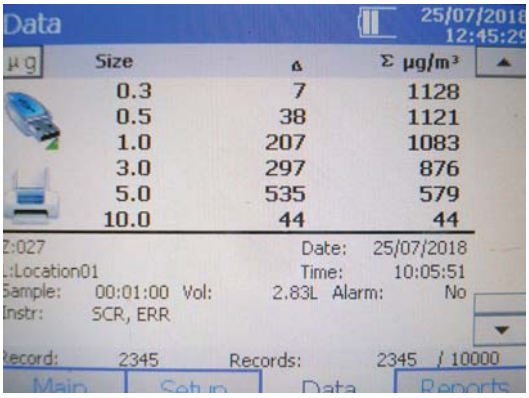


в)

г)



д)



е)

Рис. 5.39. Результаты замеров:
а) количество и б) концентрация частиц на нижнем ярусе КВОУ; в) количество и г) концентрация частиц на отметке крыши машинного зала; д) количество и е) концентрация частиц перед эксгаустером на крыше машинного зала

Суть этого простого приспособления заключается в направлении выпаров масла не вверх в атмосферу, а в горизонтальную трубу, к которой приварены патрубки, направляющие масляные пары в ведра. Количество масла, обнаруженное в ведрах, говорит об интенсивности выпаров. Конечно, такое техническое решение нельзя назвать оптимальным, хотя оно и снижает количество выбросов масляных паров в атмосферу.

Для оценки влияния выпаров эксгаустера на уровень загрязненности атмосферного воздуха на всасе ВЗТ ГТЭ-160 нами был выполнен мониторинг изменения количества и концентрации частиц по высоте КВОУ и на крыше машинного зала энергоблока при его эксплуатации (*рис. 5.39*). Измерения осуществлялось счетчиком частиц AeroTrak 9306-V2 (США), позволяющим провести количественный подсчет взвешенных в атмосферном воздухе частиц от 0,3 мкм до 10 мкм.

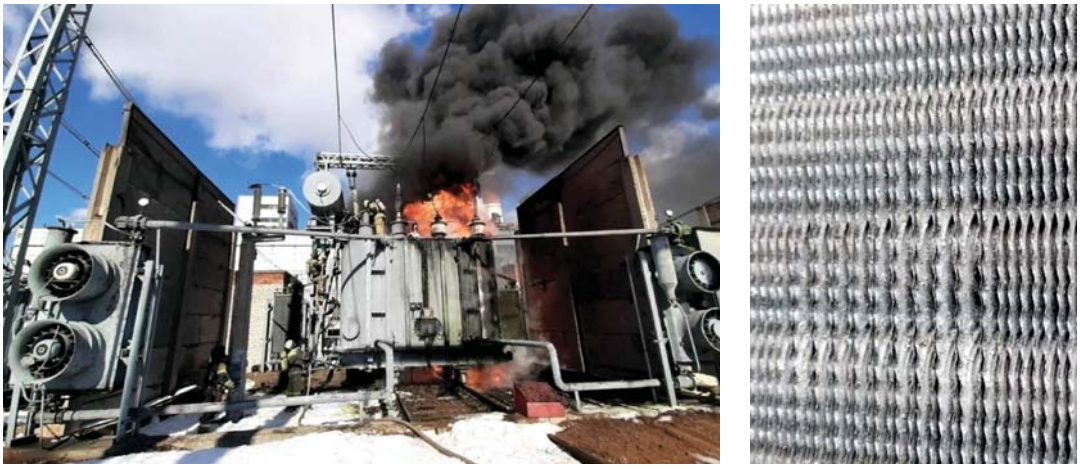
Как видно из приведенных результатов замеров, количество частиц в атмосферном воздухе увеличивается по направлению от нижнего (первого) яруса КВОУ до уровня крыши здания машинного зала. Наибольшее количество и концентрация частиц зафиксированы на крыше машинного зала непосредственно у выпаров эксгаустера (*рис. 5.39д, е*). По сравнению с нижним ярусом КВОУ ГТУ количество частиц у эксгаустера увеличено в 2,6 раза, а концентрация – в 12,7 раза. Зафиксировано резкое увеличение количества и концентрации частиц размером 5 мкм по сравнению со всасом на первом ярусе КВОУ (в 13 и 14 раз соответственно). Очевидна тенденция роста количества и концентрации частиц по направлению к крыше машинного зала энергоблока ПГУ. Это обусловлено тем, что в районе вывода эксгаустера на крышу машинного зала зафиксирована значительная площадь поверхности, покрытая масляными отложениями (*рис. 5.40*).

Рис. 5.40. Выпары эксгаустера и промасленная крыша машинного зала

Такая ситуация пожароопасна и требует мгновенно вмешательства персонала ТЭЦ с выполнением соответствующих противопожарных мероприятий и устранением причин загрязнения. Существует достаточно большое количество технических решений, позволяющих локализовать и минимизировать попадание паров масла от эксгаустеров в атмосферу.

Таким образом, в результате исследований нами определены два потенциальных источника загрязнения циклового воздуха энергетических ГТУ парами масла. К сожалению, определить химический состав маслянистых отложений на фильтрах, а также в КВОУ ГТУ и сравнить его с используемым трансформаторным маслом с целью выявления источника поступления масла в химической лаборатории ТЭЦ не удавалось ввиду образования многофракционной смеси масла, грязи, песка, влаги.

Еще большую угрозу для системы фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ представляет трансформаторное масло в случае пожара силовых трансформаторов. На энергоблоках с более мощными, чем ГТЭ-160, ГТУ количество масла в трансформаторах может достигать 45 тонн. Такая масса масла только в одном трансформаторе может поддерживать интенсивное горение оборудования с высокой температурой, которая может привести к повреждению или полному выводу из строя КВОУ, как это было на энергоблоке Ивановских ПГУ. Кроме того, горение сопровождается выделением большого количества сажи и гари (*рис. 5.41а*), которые неминуемо приведет к загрязнению теплообменного аппарата (*рис. 5.41б*) и воздушных фильтров КВОУ энергетической ГТУ.



а) *б)*

Рис. 5.41. Горение силового трансформатора:
а) выделение сажи и гари (фото МЧС России);
б) загрязнение теплообменного аппарата КВОУ ГТУ

Рис. 5.42. Энергоблок немецкой компании E.ON (фото из интернета)

Минимизировать влияние рассмотренных потенциальных источников загрязнения маслом и угроз повреждения систем фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ возможно в процессе проектирования энергоблоков с ПГУ. На *рис. 5.42* представлено фото энергоблока компании E.ON, состоящего из двух ГТУ и одной паровой турбины.

Как видно на этом рисунке, трансформаторы выработки электрической мощности и трансформаторы собственных нужд установлены не непосредственно перед КВОУ ГТУ, а со смещением относительно оси ВЗТ энергетических ГТУ. Кроме того, противопожарные стены (щиты) разделяют не только рядом стоящие трансформаторы, но и огораживают их со стороны КВОУ ГТУ. Таким образом, противопожарные щиты являются барьерами для распространения огня и паров масла на всас КВОУ ГТУ в случае повреждения силовых трансформаторов. На отечественных энергоблоках ПГУ противопожарные стены разделяют только рядом стоящие трансформаторы, не защищая ВЗТ ГТУ (*см. рис. 5.19* и *5.36*).

Выпары турбомашин на энергоблоке компании E.ON находятся на достаточно большом расстоянии и высоте от всаса КВОУ, что положительно сказывается на чистоте циклового воздуха энергетических ГТУ.

Аналогичный метод размещения силовых трансформаторов (со смещением) использован на турецкой электростанции Ali Metin Kazanci Antalyac ПГУ 900 МВт, состоящей из двух ГТУ Siemens SGT5-4000F и одной паровой турбины SST5-5000F (*рис. 5.43*).

Вентиляторная градирня находится за зданием блока ПГУ, таким образом минимизирована возможность поступления пара на всас КВОУ ГТУ и снижения выработки электроэнергии из-за повышения температуры наружного воздуха.

Рис. 5.43. ТЭЦ Ali Metin Kazanci Antalyac ПГУ 900 МВт (clck.ru/34dJiq)

Другой, не менее удачный, с точки зрения обеспечения чистоты циклового воздуха энергетических ГТУ, план энергоблока ПГУ представлен на *рис. 5.44.*

Рис. 5.44. 3D-план энергоблока ПГУ (clck.ru/34BQkZ)

При таком размещения оборудования блока ПГУ трансформаторы выработки электрической мощности и трансформаторы собственных нужд расположены в стороне от всаса КВОУ ГТУ. Кроме того, КВОУ ГТУ (выделены желтым цветом на крыше машинного зала) защищены от возможного поступления паров масла со стороны силовых трансформаторов стенами помещений загрузки/выгрузки оборудования.

Вентиляторная градирня также относительно удалена от ВЗТ, что снижает вероятность поступления на всас КВОУ влажного пара, приводящего к обмерзанию защитных сеток от птиц и снижению вырабатываемой мощности ГТУ из-за повышения температуры воздуха.

Резюме

Если такой план размещения оборудования энергоблока ПГУ согласуется с превалирующим направлением «розы ветров», то его можно считать оптимальным с точки зрения системы фильтрации циклового воздуха ГТУ.

***Настоящее** есть проявление **прошлого**,*
как бы далеко оно от нас ни отстояло.

В. И. Вернадский

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Афоризм, приведенный в заголовке этого параграфа, является лейтмотивом представленной книги. Стремительный переход к новым парогазовым технологиям в отечественной электроэнергетике не был подкреплен подготовкой специалистов соответствующего профиля. В ведущих энергетических вузах страны отсутствовали и до настоящего времени отсутствуют дисциплины или даже курс лекций по очистке циклового воздуха энергетических ГТУ. Проектные институты не обладали опытом проектирования блоков ПГУ, не было знаний, позволяющих исключить негативное влияние рядом стоящего оборудования на чистоту циклового воздуха ГТУ. В результате отсутствовала практика рационального размещения оборудования блоков ПГУ на территории ТЭЦ из-за неучета влияния «розы ветров».

Даже ведущие ученые-энергетики нашей страны считали, что в процессе эксплуатации оборудования блоков ПГУ, как и на паросиловых энергоблоках основополагающей будет водоподготовка. Кадровый голод в электроэнергетике не мог не отразиться на технических решениях, принятых в этот период времени. В первой главе мы показали, к каким последствиям приводят откровенно некомпетентные решения в проектировании и изготовлении ВЗТ для энергетических ГТУ как отечественными, так и зарубежными компаниями.

Причина ошибки — незнание лучшего.

Демокрит

Будучи активным участником внедрения современных технических решений систем очистки циклового воздуха ГТУ на энергоблоках ПГУ отечественных ТЭЦ, я провел много жарких дискуссий, похожих порой на военные баталии, с проектными институтами, руководством энергетических компаний, на научных конференциях. Дважды выступал в нашем

Белом доме, рассказывая представителям ТЭК Правительства РФ о состоянии дел с ВЗТ ГТУ при строительстве энергоблоков ПГУ в стране. Благодаря поддержке Правительства РФ, в 2007 году в РАО «ЕЭС России» мы создали «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок».

При помощи руководства ТГК-3 нам удалось отстоять Москву от американской системы импульсной очистки циклового воздуха энергетических ГТУ. А вслед за Москвой статическая система очистки воздуха ГТУ пришла в Санкт-Петербург, а затем и в другие энергетические центры страны.

«Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок» РАО «ЕЭС России» позволили специалистам энергетических компаний корректно составлять технические задания на проектирование, изготовление и закупку ВЗТ для своих ГТУ. В требованиях к ВЗТ приведен перечень комплектации КВОУ и классы воздушных фильтров по ступеням очистки воздуха в зависимости от климатических условий эксплуатации ГТУ. Во второй главе книги мы отразили эти требования и показали, как они выполняются на практике. Отметили новые виды антиобледенительных систем и систем охлаждения циклового воздуха ГТУ, нашедшие применение в электроэнергетике.

В третье главе мы еще раз показали различие в системах статической и импульсной очистки воздуха, акцентировали внимание читателей на целесообразности применения той или иной системы фильтрации циклового воздуха энергетических ГТУ. Рассмотрели конструкцию ВЗТ со статической системой фильтрации циклового воздуха энергетической ГТУ как наиболее применяемой в отечественной энергетике.

Получение исходных данных о запыленности, температуре, влажности атмосферного воздуха, атмосферных осадках, снеговых и ветровых нагрузках, что необходимо для проектирования ВЗТ ГТУ, невозможно без многолетнего мониторинга окружающей среды в месте строительства блока ПГУ. В четвертой главе книги мы показали, какое существенное влияние на загрязненность атмосферного воздуха оказывают природные явления. Нами разработана система мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на энергоблоках ПГУ в Москве, созданы рейтинги загрязненности ТЭЦ с ГТУ, осуществлена модернизация КВОУ с установкой дополнительных датчиков давления на каждой ступени фильтрации на всех всех ярусах и всасах ВЗТ. Одним словом, создана единая система мониторинга загрязненности воздуха на всасе КВОУ и за каждой ступенью очистки воздуха ГТУ. Это позволяет оценивать реальное время жизненного цикла фильтр-элемен-

тов, своевременно заменять не все фильтры одновременно, а только те, на которых достигнут предельно-допустимый перепад давления. Кроме того, анализ загрязненности воздуха за каждой ступенью фильтрации с помощью счетчиков частиц позволяет оценить пылезадерживающую способность конкретных фильтр-элементов и принять решение о их замене на более эффективные. Среди большинства энергетиков старой паросиловой закалки бытует мнение, что если перепад давления на фильтрах не растет и чем больше «стоят» фильтры в КВОУ, тем это лучше и технически, и экономически. Увы, уважаемые коллеги, это совершенно не так. Если перепад давления не растет со временем, это означает только одно – фильтр пропускает всю пыль через себя. С таким же успехом можно вообще не ставить фильтры – эффект будет тот же. Вот поэтому важно не только контролировать перепад давления на фильтрах, но и сравнивать количество частиц пыли до и после фильтр-элемента.

Прошу запомнить: визуальным критерием эффективности очистки циклового воздуха ГТУ является состояние лопаток проточной части турбомашины и «чистой» стороны КВОУ.

К сожалению, «родимые пятна» паросиловых блоков проявляются не только в этом. По привычке специалисты паросиловых установок называют ГТУ газовыми турбинами по аналогии с паровыми. Мои многочисленные попытки объяснить им, что газовая турбина является лишь составной частью газотурбинного двигателя, не увенчались успехом. Привычка – вторая натура. Такая же участь постигла и названия ВЗТ. Несмотря на руководящий документ РАО «ЕЭС России», большая часть энергетиков страны продолжают называть воздухозаборный тракт энергетических ГТУ – КВОУ. Попытки объяснить, что КВОУ это только часть ВЗТ, представляющая Filter house (*дословно – дом фильтров*), не находит отклик в умах этой части энергетиков. Кто-то скажет, что в этом нет ничего страшного. Коллеги, но, если кого-то из вас вместо Ивана Ивановича назвать Петром Петровичем, он обидится. А ГТУ и ВЗТ защитить некому. Пожалуйста, подумайте об этом.

За последние 20 лет наметился прогресс с поставкой ВЗТ для энергетических ГТУ на отечественные блоки ПГУ. На КВОУ стали устанавливать снеговые погодные козырьки, штатные противомоскитные сетки, в качестве антиобледенительной системы стали применяться теплообменные аппараты, повысился класс эффективности установленных фильтров. Хочется надеяться, что и мои многочисленные публикации

по этому вопросу внесли свой позитивный вклад в данный процесс. Но, несмотря на достигнутые успехи в подготовке циклового воздуха энергетических ГТУ, вопросы проектирования энергоблоков ПГУ остаются нерешенными, что показано в пятой главе книги.

Здравый смысл проектных решений по снижению рисков загрязнения систем фильтрации ВЗТ энергетических ГТУ оборудованием энергоблоков ПГУ должен восторжествовать.

И это в наших силах, коллеги!

Я все время живу накануне чего-то
Накануне строки, накануне полета,
Накануне любви, накануне удачи,
Вот проснусь я, и утром все будет иначе.

Николай Доризо

Из камней, упавших с души,
получится хорошая дорога к счастью.

Абу Иса ат-Термизи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ПО ГЛАВАМ

Глава 1

1. Жохов В. Л., Ленев С. Н., Савельев О. А. Анализ конструкции КВОУ на Калининградской ТЭЦ-2 // Газотурбинные технологии. – 2006. – № 4. – С. 2–6.

2. «Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок». Утверждены РАО ЕЭС России, 2008.

3. Жохов В. Л. Ошибки выбора поставщиков воздухоприемных устройств ГТУ для отечественных ТЭЦ // Энергетика. Экология. Экономика. – 2007. – № 12. – С. 20–25.

4. Жохов В. Л., Савельев О. А., Тимошевский С. А. Новые воздухозаборные устройства ГТЭ-160 на Калининградской ТЭЦ-2 // Газотурбинные технологии. – 2008. – № 3. – С. 34–37.

5. Жохов В. Л. Характеристики осевых нагнетателей при стационарных возмущениях потока на их входе // Энергомашиностроение. – 1988. – № 10. – С.4–7.

6. Маскрофт Ф. Эксплуатационная стоимость воздушных фильтров газовых турбин // Доклад на выставке «Нефть и Газ». – Москва, 2004.

7. Жохов В. Л. Невыученные уроки КВОУ Калининградской ТЭЦ-2 // Энергетика. Экология. Экономика. – 2007. – № 11. – С.16–21.

8. Воздухоочистительное устройство. Патент RU 76080 U1.

9. Будаков И. В. ГТЭ-110. Проблемы эксплуатации и причины повреждения. – Ч. 1 // Новое в российской электроэнергетике. – 2014. – № 10. – С. 32–45.

10. Будаков И. В. ГТЭ-110. Проблемы эксплуатации и причины повреждения. – Ч. 2 // Новое в российской электроэнергетике. – 2014. – № 11. – С. 12–23.

11. Будаков И. В., Мурашов П. Н., Колесников Д. Ю., Алексеев А. Б. ГТЭ-110: разработка и внедрение входной улитки из композитных материалов // Турбины и дизели. – 2019. – № 1. – С. 4–11.

12. На первом энергоблоке бывшей ГРЭС в Ивановской области произошел крупный пожар // Ивановские новости 11.10.2021

13. Музей истории Мосэнерго (https://www.mosenergo-museum.ru)

Глава 2

1. Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок». Утверждены РАО «ЕЭС России», 2008.

2. 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.

3. Жохов В. Л. Комплексные воздухоочистительные устройства компании Merram La Porte (Голландия) // Энергетика. Экономика. Экология. – 2008. – № 9. – С. 36–42.

4. Жохов В. Л. Повышение экономичности энергетических ГТУ с помощью высокоэффективных систем фильтрации воздуха // Энергетика. Экономика. Экология. – 2007. – № 4. – С. 20–27.

5. Скосарь В. Ю. Загадка воды. Кристаллы льда. Снежинки. www.samlib.ru

6. BIS Gerber GmbH. Simulation of Snow Ingress into the Protective Weather Hoods of a Filter Housing. 2011.

7. Жохов В. Л. Современные технологии воздухоподготовки ГТУ // Энергетика. Экономика. Экология. – 2007. – № 6. – С. 48–57.

8. Матвеев Е. Н. Опыт эксплуатации ГТЭ-20С // Тезисы доклада на 53-й научно-технической сессии по проблемам газовых турбин РАН. – 2006. – С. 153–154.

9. Жохов В. Л. Защита двигателей от двукрылых насекомых // Турбины и дизели. – 2007. – № 1. – С. 20–22.

10. Жохов В. Л., Ленев С. Н. Защита энергетических ГТУ от двукрылых насекомых и плодов цветения растений. – Мосэнерго, 2020. – 100 с.

11. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов // М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 1999. – 592 с.

12. Жохов В. Л., Кондратьев Ю. Г. Состояние рынка систем фильтрации воздуха энергетических ГТУ отечественных ТЭЦ // Новое в российской электроэнергетике. – 2010. – № 3. – С. 46–55.

13. Жохов В. Л, Лохматов А. А. Исследование влияния неравномерности потока на характеристики компрессора // Судостроение. – 1986. – № 4. – С. 19–20.

14. Жохов В. Л. Помпаж в одноступенчатых нагнетателях // Энергомашиностроение. – 1988. – № 3. – С. 10–12.

15. Жохов В. Л. Модернизация комплексного воздухоочистительного устройства как вариант устранения ошибок проектирования // Новое в российской электроэнергетике. – 2015. – № 2. – С. 31–41.

16. Viledon Ice protect Brochure, June 2011.

17. Основной боевой танк России. Откровенный разговор о проблемах танкостроения. – Ч. 3. – Гл. 7. Пыль – враг № 1 танкового двигателя (www.arsenal-info.ru).

18. ГТЭ-160. Поправочные коэффициенты.

19. SGT5-4000F. Поправочные коэффициенты.

20. Жохов В. Л., Ленев С. Н., Фролов А. В. Первые результаты внедрения охладительных установок испарительного типа циклового воздуха энергетических ГТУ в ПАО «Мосэнерго» // Новое в российской электроэнергетике. – 2021. – № 1. – С. 34–45.

21. Жохов В. Л. Охладительные установки испарительного типа энергетических ГТУ. – Рыбинск: ИД «Газотурбинные технологии», 2023. – 96 с.

22. Беркович А. Л., Полищук В. Г., Рассохин В. А. Впрыск воды в компрессор ГТУ. – Под ред. А. Л. Берковича. – СПб: Изд-во Политехнического университета, 2010. – 151 с.

23. Komuro T., Ito E., Sonoda T., Tomita Y., Hidaka K., Shibutani S. Power output of gas turbine combined cycle by inlet-air cooling system of chiller type under high ambient air temperature // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. – Vol. 47. – No. 4 (December, 2010). – P. 33–39.

24. Bacigalupo E., Tasso L. and Zinnari R.G. Power Augmentation Using an Inlet Air Chilling System in a Cogenerative Power Plant Equipped with Heavy Duty Gas Turbine. ASME Cogen – Turbo 1993, Bournemouth, IGTI – Volume 8.

25. Bhargava R. and Meher-Homji C.B. Parametric Analysis of Existing Gas Turbine with Inlet Evaporate and Overspray Fogging. ASME International Gas Turbine and Aeroengine Conference, Amsterdam, The Netherlands, June 3–6, 2002, ASME Paper No: GT-2002-30560.

26. De Lucia M., Bronconi R., and Camvale E. Performance and Economic Enhancement of Cogeneration Gas Turbines Through Compressor Inlet Air Cooling. International Gas Turbine and Aeroengine Congress, Cincinnati, Ohio, ASME Paper No: 93-GT-71.

27. De Piolene M. Refrigerated Inlet Cooling for New and Retrofit Installations. Gas Turbine World, May – June 1993.

28. Цанаев С. В., Буров В. Д., Земцов А. С., Осыка А. С. Газотурбинные энергетические установки. – М.: МЭИ, 2022. – 428 с.

29. Шахин Н., Акул Х. Системы охлаждения воздуха на входе в газотурбинные установки // Турбины и дизели. – 2011. – № 2. – С. 8–11.

30. Догадин Д. Л., Анохин А. Б., Латыпов Г. Г., Крыкин И. Н. Применение абсорбционных бромисто-литиевых холодильных машин (АБХМ) в производственном цикле электрических станций // Электрические станции. – 2014. – № 10. – С. 40–46.

31. Матюнин Д. Ю., Полуэктова Т. Ю., Анохин А. Б., Крыкин И. Н. Об итогах реализации проекта охлаждения циклового воздуха компрессора ГТУ ПГУ-110 с применением АБХМ // Газотурбинные технологии. – 2015. – № 8. – С. 12–16.

32. Цхяев А. Д., Кузьмина Т. Г. Использование АБХМ в системах охлаждения воздуха на входе в компрессор ГТУ // Турбины и дизели. – 2015. – № 5. – С. 10–13.

33. Агабабов В. С. Влияние детандер-генераторных агрегатов на тепловую экономичность тепловых электрических станций. Дисс... д. т. н. – 2003. – 354 с.

34. Капица, П. Л. Турбодетандер для получения низких температур и его применение для сжижения воздуха / П. Л. Капица // ЖТФ. – 1939. – Т. 9. – Вып. 2. – С. 99–123.

35. Бродянский В. М. Сопоставление эффективности парокомпрессионных и воздушных холодильных машин / В. М. Бродянский, Е. Н. Серова, И. М. Калнинь // Холодильная техника. – 1999. – № 11–12.

Глава 3

1. Жохов В. Л. Анализ принятых решений по выбору систем фильтрации воздуха ГТУ ТЭЦ // Энергетика. Экономика. Экология. – 2007. – № 7. – С. 30–37.

2. 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.

3. 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.

4. Жохов В. Л., Аккайа Б. Воздушные фильтры для энергетических ГТУ. – Рыбинск: ИД «Газотурбинные технологии», 2023. – 335 с.

5. Жохов В. Л. Современные технологии воздухоподготовки ГТУ // Энергетика. Экономика. Экология. – 2007. – № 6. – С. 48–57.

6. FAIST AIS. RU1126-MBL-&BDC020-355636. Description of the system. 2018.

Глава 4

1. Материалы технической конференции и экспозиции турбомашиностроения GT 2016. (Материалы выставки «ASME Turbo Expo 2016» в Южной Корее).

2. Жохов В. Л., Ленев С. Н. Результаты эксплуатации КВОУ блоков ПГУ ПАО «Мосэнерго» и планы по их модернизации // Новое в российской электроэнергетике. – 2016. – № 2. – С. 33–43.

3. Жохов В. Л., Ленев С. Н. Влияние слоистости приземного слоя тропосферы на работу воздушных фильтров // Новое в российской электроэнергетике. – 2017. – № 7. – С. 30–39.

4. Новости пресс-службы Правительства Москвы. Справка по состоянию атмосферного воздуха в Москве на 15:00 02 августа 2010 г.

5. Справка о загрязнении воздуха и метеорологических условиях в г. Москве по состоянию на 03.08.2010 года.

6. О санитарно-эпидемиологическом состоянии территорий, пострадавших от пожара, и мерах, принимаемых Роспотребнадзором, по состоянию на 4 августа 2010 года.

7. О санитарно-эпидемиологическом состоянии территорий, пострадавших от пожара, и мерах, принимаемых Роспотребнадзором, по состоянию на 5 августа 2010 года.

8. Жохов В. Л., Ленев С. Н. Влияние лесных пожаров на работу фильтров КВОУ // Новое в российской электроэнергетике. – 2017. – № 3. – С. 34–42.

9. Жохов В. Л. Рейтинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ // Газотурбинные технологии. – 2019. – № 2. – С. 42–46.

10. Голов П. В., Жохов В. Л., Ленев С. Н. Сервисное обслуживание КВОУ ГТУ ПАО «Мосэнерго» // Газотурбинные технологии. – 2019. – № 9. – С. 20–26.

11. Жохов В. Л., Ленев С. Н. Сравнительный анализ климатических условий эксплуатации КВОУ ГТУ с трехсторонним всасом ТЭЦ с ПГУ ПАО «Мосэнерго» // Новое в российской электроэнергетике. – 2018. – № 7. – С. 31–40.

12. 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.

Глава 5

1. Жохов В. Л. Влияние ошибок проектирования на работу КВОУ ГТУ // Новое в российской электроэнергетике. – 2019. – № 5. – С. 22–30.

2. Жохов В. Л., Аккайа Б. Воздушные фильтры для энергетических ГТУ. – Рыбинск: ИД «Газотурбинные технологии», 2023. – 335 с.

3. 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.

4. Жохов В. Л., Ленев С. Н. Анализ влияния окружающей среды на эксплуатацию КВОУ ГТУ Северной ТЭЦ // Газотурбинные технологии. – 2018. – № 2. – С. 34–39.

ELBA FILTER
MANUFACTURING RUS

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: активоугольный слой
рамка: пластик (PS)

Мы предлагаем энергоэффективные фильтры класса A+, прошедшие сертификацию в Evrovent 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,
Аккайа Бюлент

ВОЗДУХОЗАБОРНЫЕ ТРАКТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГТУ

Компьютерная верстка *Одинцова И. А.*
Корректор *Смирнов В. В.*

Подписано в печать 00.12.23 г. Формат 70×100/16.
Бумага офсетная. Гарнитура NewtonC.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 00,0.
Тираж 200 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 978-5-6045651-3-1