

В. Л. ЖОХОВ

Охладительные установки испарительного типа энергетических ГТУ

Издание второе, переработанное и дополненное

Рыбинск
ИД «Газотурбинные технологии»
2026

УДК 62–716
ББК 31.26–046
Ж82

Жохов В.Л.

Ж82 Охладительные установки испарительного типа энергетических ГТУ.— Изд. 2-е, перераб. и доп.— Рыбинск: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2026.— 192 с.
ISBN 978–5–6045651–4–8

В книге представлены результаты эксплуатации и анализа эффективности установок испарительного адиабатического охлаждения воздуха на ТЭЦ ПАО «Мосэнерго», обозначенных автором как ТЭЦ-1 с ГТУSGT5–2000Е, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 с ГТУSGT5–4000F.

Интерес к таким установкам возник не случайно, он вызван желанием повысить эффективность использования ПГУ в летнее время, характеризующееся в столичном регионе температурами воздуха выше 20–25 °С и относительной влажностью порядка 60%. Хорошо известно, что в таких условиях мощность газотурбинных двигателей снижается и соответственно падает мощность ПГУ, в составе которых они работают. Поэтому ведущие производители ГТУ стали активно использовать различные способы увеличения мощности при высоких положительных температурах наружного воздуха (впрыск пара или воды, туманообразователи и т. п.). Наиболее эффективным является впрыск пара в камеру сгорания ГТУ, вторым по эффективности и значительно более дешевым — применение установок адиабатического испарения.

Именно эти охлаждающие установки испарительного типа (ОУ ИТ) были смонтированы в ПАО «Мосэнерго» и успешно эксплуатируются в течение семи лет.

Книга посвящена анализу эффективности применения ОУ ИТ и главных ограничений при их эксплуатации в Московском регионе. Повышенный интерес к первому изданию стимулировал подготовку второго, переработанного и дополненного новыми исследованиями.

Автор благодарит сотрудников ПАО «Мосэнерго» за совместное участие в реализации этих проектов: К.И. Чиняева, А.С. Козубенко и заместителя управляющего директора — главного инженера С.Н. Ленёва. Особую признательность автор высказывает П.В. Леонтьеву, руководителю ООО «Фильтрационные Технологии», за оказанную помощь в предоставлении кассет ОУ ИТ и проведении их испытаний в лабораторных и в натурных условиях, а также в процессе подготовке книги к публикации.

УДК 62–716
ББК 31.26–046

ISBN 978–5–6045651–4–8

© В.Л. Жохов 2026
© ИД «Газотурбинные технологии», 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Глава 1. Технические решения по охлаждению циклового воздуха энергетических ГТУ	8
Глава 2. Оценка эффективности ОУ ИТ энергетической ГТУ SGT5-4000F ПГУ-450	20
2.1. Анализ инвестиционного проекта ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ	20
2.2. Оценка эффективности ОУ ИТ на ПГУ ТЭЦ ПАО «Мосэнерго»	24
Глава 3. Мониторинг параметров циклового воздуха энергетических ГТУ с ОУ ИТ	31
Глава 4. Влияние фактора воды на эксплуатацию ОУ ИТ энергетических ГТУ	44
Глава 5. Опыт обслуживания и модернизации ОУ ИТ энергетических ГТУ	58
Глава 6. Сравнительный анализ эксплуатации ОУ ИТ энергетических ГТУ в ПАО «Мосэнерго»	75
Глава 7. Анализ результатов эксплуатации кассет ОУ ИТ ГТУ	92
Глава 8. Технические решения по защите материала кассет от повреждений и загрязнений, повышению прочности и долговечности каплеуловителей ОУ ИТ ГТУ	106
8.1. Анализ рынка производителей и поставщиков материалов сотового увлажнения и кассет для ОУ ИТ	106
8.2. Влияние материала и конструктивных особенностей сотового увлажнения на аэродинамические характеристики ОУ ИТ ГТУ	119
8.3. Влияние характеристик и конструктивных особенностей сотового увлажнителя на капиллярную впитываемость материала ОУ ИТ ГТУ	126
8.4. Стойкость материала кассет к внешним климатическим воздействиям и огню	133
8.5. Защита кассет ОУ ИТ энергетических ГТУ от плодов цветения растений и двукрылых насекомых	140
8.6. Защита кассет ОУ ИТ от механических повреждений с целью повышения их срока службы и эффективности увлажнения циклового воздуха ГТУ	149
8.7. Импортозамещение ремонтного комплекта ОУ ИТ энергетических ГТУ	156
Заключение	166
Краткая историческая справка	170
Список литературы по главам	183

ПРЕДИСЛОВИЕ

В предисловии ко второму изданию книги В. Л. Жохова, посвященной охладительным установкам испарительного типа (ОУ ИТ) энергетических ГТУ, хочу отметить, что в 2025 году автором была оказана техническая помощь Новогорьковской ТЭЦ при обследовании состояния ОУ ИТ ГТУ, а также даны рекомендации по замене установленных кассет на кассеты отечественного производства.

На Новогорьковской ТЭЦ с 2021 года эксплуатируются ОУ ИТ производства Munters & Co в составе КБОУ ГТУ GT13T2. Техническое перевооружение КБОУ с монтажом установки охлаждения циклового воздуха испарительного типа позволило существенно увеличить располагаемую мощность ГТУ в период высоких температур окружающей среды за счет снижения температуры воздуха на входе в осевой компрессор.

В *главе 1* первого издания книги кратко представлены возможные технические решения по охлаждению циклового воздуха энергетических ГТУ. Дается краткая характеристика применяемых технических решений с указанием преимуществ и недостатков схем.

В *главе 2* изложена оценка эффективности ОУ ИТ, приводится детальный анализ инвестиционного проекта внедрения на ТЭЦ-3 ПАО «Мосэнерго» ОУ ИТ на ГТУ марки SGT5–4000F ПГУ-450.

В *главе 3* затронуты важные аспекты доработки штатной схемы мониторинга параметров циклового воздуха энергетических ГТУ с ОУ ИТ. Доработанная схема мониторинга циклового воздуха позволяет оценивать влияние относительной влажности воздуха на работу воздушных фильтров, что помогает оптимизировать затраты на их закупку.

Особое внимание заслуживает тема влияния химического состава используемой в испарительной установке ГТУ воды, рассмотренная в *главе 4*. В ней представлен сравнительный анализ применения различной питательной воды испарительных установок (артезианской, водопроводной, осветленной и химобессоленной) по показателям pH, жесткости, общей минерализации, а также отложениям в трубах. Эта глава должна быть интересна инженерно-техническому персоналу эксплуатирующих и проектных организаций при разработке технических решений.

В главе 5 дан ряд практических советов по опыту обслуживания и модернизации ОУ ИТ энергетических ГТУ, необходимых обслуживающему персоналу тепловых электростанций.

В главах 6 и 7 приводится сравнительный анализ эксплуатации ОУ ИТ энергетических ГТУ в ПАО «Мосэнерго», а также проанализированы результаты эксплуатации кассет ОУ ИТ с описанием характерных дефектов, повреждений конструкции и характера их загрязнения.

В заключение книги дана очень интересная историческая справка об основателе компании Munters & Co К. Г. Мунтерсе и его изобретениях. Она будет полезна отечественным фирмам-изготовителям подобной продукции в части импортозамещения и создания технологического суверенитета нашей страны.

С учетом научной и практической новизны рассматриваемой технологии охлаждения воздуха, новая книга будет полезна инженерно-техническому персоналу тепловых электростанций, энергетических проектных и наладочных организаций, а также студентам и аспирантам технических вузов.

От себя хочу пожелать Владимиру Леонидовичу творческого вдохновения, успехов в научной и профессиональной деятельности, а также новых открытий и достижений!

*Заместитель главного инженера
по обеспечению технического состояния — начальник управления
обеспечения технического состояния
филиала «Нижегородский» ПАО «Т Плюс»
А. В. Гаврилов*

В преддверии выхода в свет второго издания книги В. Л. Жохова «Охладительные установки испарительного типа энергетических ГТУ» необходимо отметить достоинства первого издания. Сейчас уже несколько отечественных электростанций эксплуатируют охлаждающие установки циклового воздуха ГТУ, однако никакой технической литературы для инженерного состава, кроме инструкций по эксплуатации, нет. Первое издание вместило в себя не только теоретические основы различных технических решений по охлаждению воздуха ГТУ, но и опыт эксплуатации их на нескольких ТЭЦ в Московском регионе. В книге доступным инженерным языком изложены не только разработанные автором принципы и методики мониторинга работы испарительных установок, работающих по адиабатическому циклу, но и конкретные методы их реализации. Глубоко проработана тема использования различных видов воды для охлаждающих установок испарительного типа (ОУ ИТ) ГТУ — от водопроводной до ХОВ.

Также заслуживает внимания сравнительный анализ работы ОУ ИТ ГТУ на нескольких ТЭЦ ПАО «Мосэнерго». Введенный автором «коэффициент эффективности» работы ОУ ИТ характеризует наиболее оптимальный режим эксплуатации ИУ в различных климатических условиях.

В книге представлена информация об опыте эксплуатации кассет и каплеуловителей ОУ ИТ различных производителей, в том числе и отечественных. Актуальность данного вопроса повысилась в связи с прекращением поставок в РФ продукции оригинального производителя. В то же время на отечественном рынке появилось большое количество «альтернативных» поставщиков, продукция которых незнакома отечественному потребителю.

Познавательным и полезным является краткая историческая справка, показывающая этапы развития К. Мунтерсом этого направления. По его изобретениям видно, как шаг за шагом создавались основы охлаждающих установок, работающих по адиабатическому циклу.

В заключение хочется отметить, что книга полезна и своевременна, она позволяет лучше понять процессы, происходящие в ОУ ИТ, преимущества и недостатки такого оборудования, расширяет диапазон вариантов технических решений для отечественного инженерного состава электростанций по использованию различного вида оборудования для охлаждения циклового воздуха энергетических ГТУ.

От себя лично хочу пожелать Владимиру Леонидовичу дальнейших творческих успехов в научной и производственной деятельности.

*Заместитель директора по производству —
главный инженер филиала
«Невинномысская ГРЭС» ПАО «ЭЛС-Энерго»
В. Б. Нечаев*

Книга В. Л. Жохова «Охладительные установки испарительного типа энергетических ГТУ» представляет особый интерес для Казанской ТЭЦ-3, поскольку мы рассматриваем возможность установки на нашей ГТУ охлаждающей установки испарительного типа (ОУ ИТ), работающей по адиабатическому циклу. С целью обмена опытом мы посетили несколько электростанций ПАО «Мосэнерго» с ОУ ИТ ГТУ, ознакомились с их устройством и опытом эксплуатации.

Опыт эксплуатации ОУ ИТ ГТУ на блоках ПГУ ПАО «Мосэнерго», изложенный в книге, является ценным материалом для инженерного персонала, поскольку никакой отечественной технической литературы по этому вопросу, кроме редких статей, нет. В книге в хронологическом порядке изложен весь процесс принятия решения: от подготовки инвестиционного проекта с учетом нескольких вариантов использования различного вида цикловой воды для ОУ ИТ, результатов испытаний и ввода нового оборудования в эксплуатацию до анализа работы установки на базе разработанных коэффициентов использования и эффективности.

Следует отметить разработанную автором систему мониторинга параметров ОУ ИТ вдоль всего воздухозаборного тракта ГТУ. Благодаря этой системе операторы блока ПГУ на блочном щите управления могут контролировать не

только температуру и влажность циклового воздуха перед осевым компрессором ГТУ, но и изменение параметров по всему тракту. Ранее внедренная система мониторинга перепада давления на воздушных фильтрах позволяет оценивать влияние повышенной влажности циклового воздуха как на систему фильтрации циклового воздуха, так и на ГТУ в целом.

Особо актуальным в настоящее время является вопрос импортозамещения комплектующих ОУ ИТ ГТУ. Поэтому интересным и важным считаем приведенный в книге опыт эксплуатации ОУ ИТ ГТУ с испарительными кассетами зарубежных и отечественных производителей.

Опыт ПАО «Мосэнерго» по длительной эксплуатации ОУ ИТ ГТУ будет непременно использован при разработке проекта аналогичного оборудования на Казанской ТЭЦ-3. Уверены, что второе издание книги подарит отечественным инженерам новые знания в вопросе охлаждения циклового воздуха энергетических ГТУ.

От себя лично хочу пожелать В. Л. Жохову новых творческих успехов в производственной и научной деятельности.

Руководитель направления по ГТУ Казанской ТЭЦ-3
Р. К. Авзалов

Запомни правило трех Н:
Нет Ничего Невозможного.
Философия успеха

ГЛАВА 1

Технические решения по охлаждению циклового воздуха энергетических ГТУ

Известной конструктивной особенностью газотурбинных установок (ГТУ) 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. 1.1* представлена зависимость выходной мощности и КПД ГТУ Siemens SGT5–4000F от температуры воздуха перед ее осевым компрессором. При

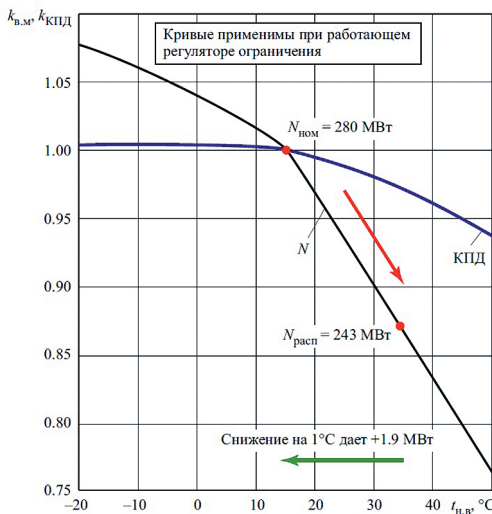


Рис. 1.1. Зависимость выходной мощности и КПД ГТУ Siemens SGT5-4000F от температуры наружного воздуха

ее осевым компрессором. При расчетной температуре воздуха $+15^\circ\text{C}$ номинальная мощность ГТУ $N_{ном} = 280 \text{ МВт}$ и $K_{КПД} = 1,0$. С ростом температуры воздуха КПД и располагаемая мощность ГТУ снижаются. При температуре воздуха $+32^\circ\text{C}$ располагаемая мощность ГТУ $N_{расп}$ составит всего 243 МВт, что приводит к снижению маржинальной прибыли.

Увеличение температуры наружного воздуха с $+15$ до $+25^\circ\text{C}$ приводит к снижению электрической нагрузки ГТУ M701F4 МНІ ориентировочно на 17,10 МВт ($1,71 \text{ МВт}/^\circ\text{C}$).

Особенно это актуально для блоков ПГУ (парогазовых

установок), 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 принудительное охлаждение циклового воздуха ГТУ охлаждающими установками:

- испарительного типа с подачей воды перед системой фильтрации комплексного воздухоочистительного устройства (КВОУ) ГТУ (evaporativecoolingsystem) [1, 2];

- с впрыском химически очищенной воды после системы фильтрации КВОУ ГТУ (foggingsystem) или на входе в осевой компрессор ГТУ (wetcompression) [3–9];

- с абсорбционными холодильными машинами (АБХМ, absorptionchiller) [10–13];

- с детандер-генераторными агрегатами (ДГА) [14, 15];

- с парокомпрессионными термотрансформаторами, работающими в режиме холодильной машины [16].

Проанализируем эти технические решения, отметим их преимущества и недостатки.

Охладительная установка воздуха испарительного типа

Принцип работы охлаждающей установки воздуха испарительного типа (ОУ ИТ) заключается в снижении температуры всасываемого воздуха перед КВОУ ГТУ за счет его увлажнения подаваемой водой. Поступление 1 г воды в один килограмм горячего сухого воздуха снижает его температуру на 2,5 °С (рис. 1.2). ОУ ИТ проектируется таким образом, чтобы эффективность насыщения всасываемого воздуха влагой превышала 90%. Процесс охлаждения воздуха в такой установке близок к адиабатическому.

ОУ ИТ формируется из нескольких модулей, устанавливаемых перед каждым ярусом и входом в КВОУ ГТУ (рис. 1.3а).

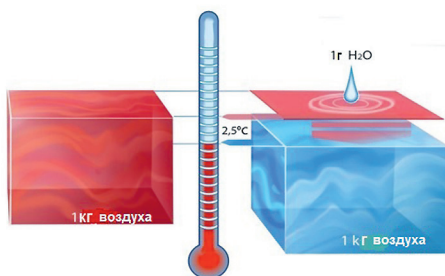


Рис. 1.2. Принцип снижения температуры воздуха подачей воды (www.filters.ru)

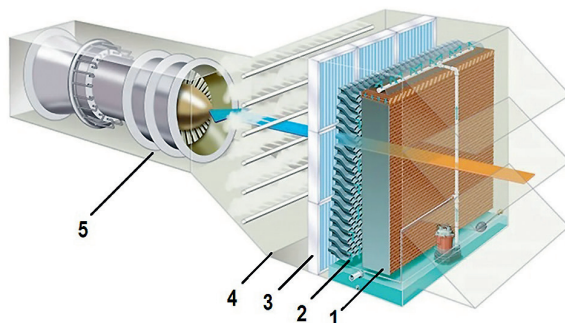


Рис. 1.3а. 3D-модель работы ОУ ИТ ГТУ (www.munters.com)

Каждый модуль состоит из двух частей: пористого материала испарительных кассет 1 и установленного за ними каплеуловителя 2 для предупреждения попадания жидких аэрозолей на воздушные фильтры 3 первой ступени очистки циклового воздуха ГТУ. Пройдя систему очистки 4 в КВОУ, цикловой воздух поступает в осевой компрессор 5.

В районах с жарким климатом для охлаждения циклового воздуха ГТУ небольшой мощности в качестве ОУ ИТ используются испарительные увлажнители воздуха без каплеуловителей (рис. 1.3б).

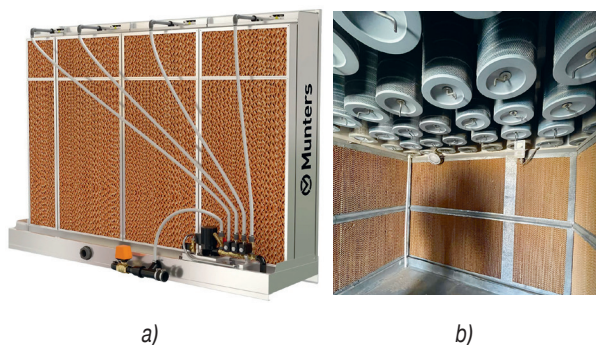


Рис. 1.3б. Испарительный увлажнитель: а – FA6 (www.munters.com);
б – в КВОУ ГТУ Solar Taurus 70

Эффективность охлаждения E рассчитывается по формуле:

$$E = \frac{T_H - T_B}{T_H - T_{Bт}},$$

где E — эффективность охлаждения, T_H — температура наружного воздуха; T_B — температура воздуха за ОУ ИТ; $T_{Bт}$ — температура по влажному термометру.

Схема, по которой работает ОУ ИТ энергетической ГТУ, представлена на рис. 1.3в.

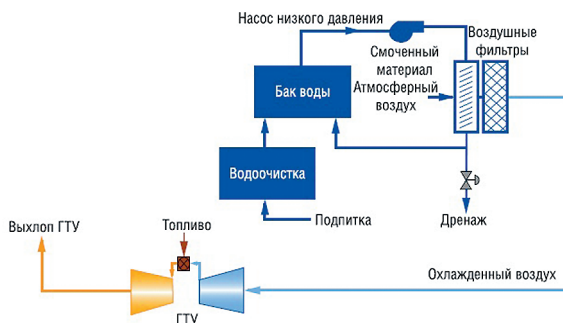


Рис. 1.3в. Схема работы ОУ ИТ ГТУ

Испарившаяся в ОУ ИТ вода пополняется из бака с помощью насоса низкого давления. Для пополнения бака и снабжения модулей ОУ ИТ используется химически очищенная вода (ХОВ). Однако в случае удовлетворительного качества воды, минимизирующего отложения на пористом материале матов, допускается использовать водопроводную воду или воду из артезианских скважин и колодцев.

Преимуществами данной системы являются:

- относительно низкие капитальные затраты;
- относительно небольшие сроки установки и ввода в эксплуатацию;
- низкие затраты на ремонт и обслуживание;
- возможность работы не на ХОВ;
- отсутствие негативного воздействия на проточную часть осевого компрессора ГТУ;
- низкое потребление электроэнергии на собственные нужды.

В качестве *недостатков* данной системы можно отметить:

- ограниченную глубину охлаждения воздуха, зависящую от его влажности;
- перепад давления на смоченном материале может превышать 140 Па в весенне-летний период эксплуатации;
- хрупкость материала испарительных кассет, изготовленных из целлюлозы, и подверженность их механическим повреждениям.

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 (*фото 1.4*).



Фото 1.4. Распыл ХОВ через форсунки

Подача ХОВ в форсунки осуществляется насосом высокого давления (около 15 МПа) с регулируемой частотой вращения, что позволяет выполнять ступенчатую подачу воды в зависимости параметров воздуха.

Обычно по месту подачи деминерализованной воды различают два способа: за систему фильтрации воздуха КВОУ (*фото 1.5*) и перед осевым компрессором ГТУ.



Фото 1.5. Система подачи воды ХОВ за фильтрами КВОУ ГТУ

Принципиальные схемы этих способов подачи ХОВ через форсунки приведены на *рис. 1.6*.

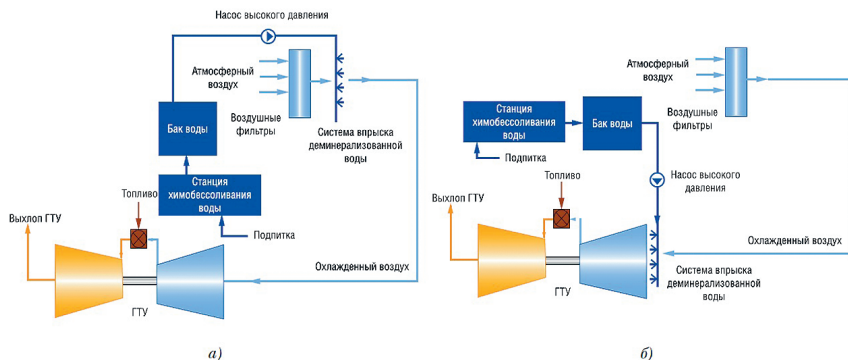


Рис. 1.6. Принципиальная схема системы охлаждения воздуха с впрыском ХОВ: а) после системы фильтрации КВОУ; б) на входе в осевой компрессор ГТУ

В первом случае (рис. 1.6а) основной задачей системы является насыщение потока воздуха до влажности более 90% при одновременном снижении его температуры.

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. 1.6б) 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. Следует заметить, что размещение форсунок для распыла ХОВ вблизи ВНА осевого компрессора ГТУ потребует модернизации его лопаточного аппарата.

Преимуществами данной системы являются:

- увеличение мощности ГТУ на 4–6% независимо от влажности атмосферного воздуха;
- сокращение выбросов 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;
- требуется 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.

Однако в последнее время нашел применение распыл воды через форсунки перед воздушными фильтрами КВОУ ГТУ (*фото 1.7*).



Фото 1.7. Подача воды через форсунки перед воздушными фильтрами КВОУ ГТУ

К недостаткам этой системы подачи воды (по сравнению с предыдущими) добавляется увлажнение воздушных фильтров, приводящее к росту перепада на них и негативно влияющее на выработку мощности ГТУ.

Система охлаждения воздуха с бромисто-литиевыми холодильными машинами

Охлаждение атмосферного воздуха в этой системе происходит за счет теплопередачи от охлажденной среды, протекающей через оребренную поверхность теплообменника, установленного после АБХМ. Принципиальная

схема системы охлаждения циклового воздуха с использованием АБХМ приведена на *рис. 1.8*.

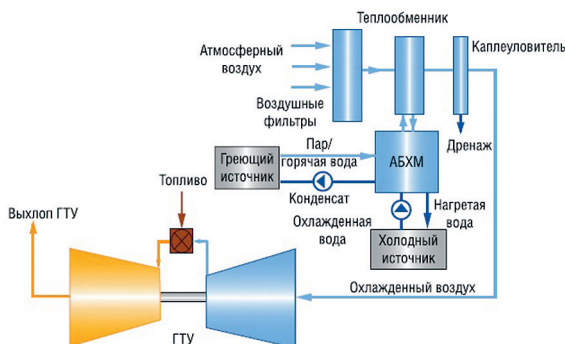


Рис. 1.8. Принципиальная схема системы охлаждения циклового воздуха с использованием АБХМ

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 $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ и забирает тепло от охлаждаемого контура. Оставшийся концентрированный раствор бромидов 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 бромидов лития перекачивается в генератор через регулятор/теплообменник, и цикл повторяется снова. Внешний вид АБХМ представлен на *рис. 1.9*.

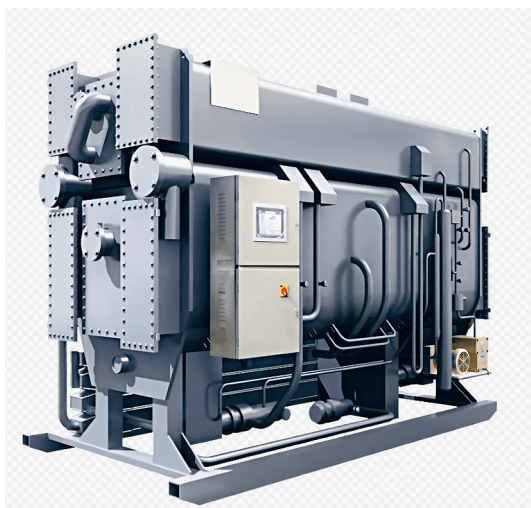


Рис. 1.9. Внешний вид АБХМ (www.topclimat.ru)

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 воздуха с турбодетандерами

Принципиальная схема системы охлаждения циклового воздуха с помощью турбодетандеров представлена на *рис. 1.10*. Система охлаждения имеет промежуточный контур, связывающий детандер-генераторный агрегат (ДГА) с КВОУ ГТУ.

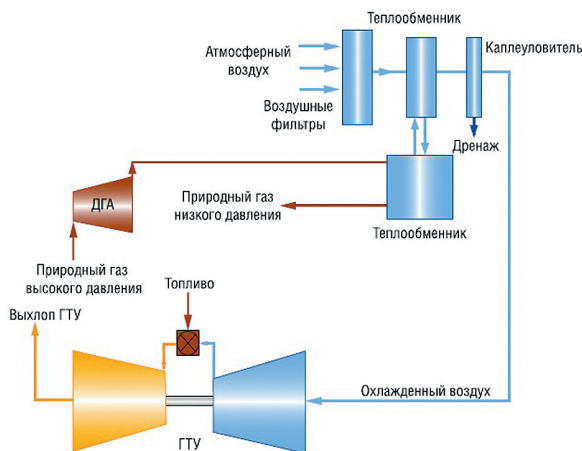


Рис. 1.10. Принципиальная схема системы охлаждения циклового воздуха с помощью турбодетандеров

Хладоносителем в промежуточном контуре является этиленгликоль или любой другой агент с низкой температурой застывания (не выше температуры газа после детандера). Охлаждение происходит за счет теплопередачи от хладоносителя промежуточного контура, протекающего через внутреннюю часть теплообменной трубы, к цикловому воздуху, поступающему в КВОУ.

Внешняя часть теплопередающих поверхностей должна иметь развитое ребрение. Теплообменные поверхности предпочтительнее устанавливать внутри КВОУ. Внешний вид ДГА представлен на *фото 1.11*.



Фото 1.11. Внешний вид ДГА

Преимущества системы охлаждения воздуха с помощью ДГА:

- 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.

Система охлаждения с парокомпрессионными термотрансформаторами, работающими в режиме холодильной машины

Для снижения температуры воздуха на входе в компрессор ГТУ могут быть использованы парокомпрессионные термотрансформаторы (ПКТТ), работающие в режиме холодильной машины. Принципиальная схема системы охлаждения циклового воздуха с использованием ПКТТ приведена на *рис. 1.12*.

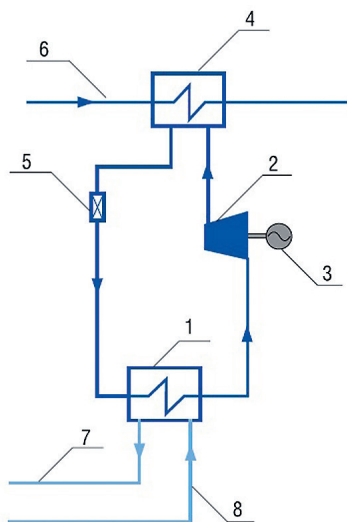


Рис. 1.12. Принципиальная схема парокompрессионного термотрансформатора: 1 — испаритель; 2 — парокompректор; 3 — электродвигатель; 4 — конденсатор; 5 — дроссель; 6 — нагреваемая среда; 7 — линия подачи холодного воздуха к КВОУ; 8 — линия подачи атмосферного воздуха к испарителю

ПКТТ включает в себя устройство для сжатия рабочего тела (в данном случае — компрессор 2) и устройство, в котором происходит расширение рабочего тела (хладагента) — дроссель 5. Процессы, происходящие в ПКТТ, представлены на рис. 1.13 в T-S-диаграмме.

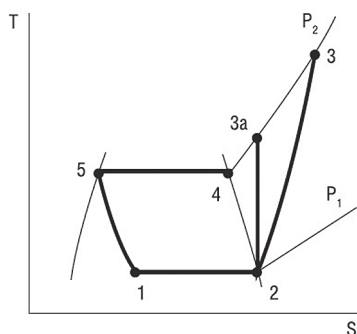


Рис. 1.13. Процессы в парокompрессионном термотрансформаторе

Установка работает следующим образом. Рабочее тело (хладагент), поступающее в испаритель 1 (рис. 1.12), в основном находится в жидком состоянии (точка 1 на рис. 1.13). В испарителе к рабочему телу подводится атмосферный

воздух, в результате чего там происходит парообразование хладагента (*процесс 1–2*), после чего хладагент поступает в парокompректор 2, приводом которого служит электродвигатель 3. В парокompректоре хладагент сжимается от давления P_1 до давления P_2 (*процесс 2–3*), в результате чего его температура повышается от температуры, соответствующей точкам 1 и 2, до температуры, соответствующей точке 3. Из парокompктора хладагент направляется в конденсатор 4, где его температура сначала снижается до температуры конденсации при давлении P_2 (*точка 4*), после чего хладагент конденсируется (*процесс 4–5*), отдавая теплоту нагреваемой среде 6. После конденсатора 4 хладагент направляется в дроссель 5, где поток дросселируется до давления P_1 , и цикл замыкается. Давление P_1 выбирается таким, чтобы соответствующая ему температура насыщения была ниже температуры атмосферного воздуха и в испарителе 1 были бы обеспечены условия для теплообмена.

Важную роль в ПКТТ играет хладагент. В зависимости от температуры кипения при атмосферном давлении хладагенты подразделяют на 3 группы: высокотемпературные (выше -10°C), умеренные (ниже -10°C) и низкотемпературные (ниже -50°C). Выбор хладагента, циркулирующего в контуре, зависит от требуемого уровня температур нагреваемой и/или охлаждаемой среды.

Преимущества системы охлаждения с использованием ПКТТ:

- возможность точного регулирования температуры хладоносителя в зависимости от температуры окружающей среды;
- возможность увеличения производительности ГТУ независимо от влажности воздуха.

Недостатки ПКТТ:

- требования, предъявляемые к хладагентам: низкая температура кипения при давлении выше атмосферного; умеренное давление и температура конденсации; низкая температура затвердевания и высокая критическая температура; большая теплота парообразования при малых удельных объемах паров; малая теплоемкость; высокая теплопроводность; взрывобезопасность; нетоксичность; негорючесть;
- риск утечки хладагента из теплообменника термотрансформатора, работающего в данном случае как холодильная машина, в проточную часть компрессора ГТУ.

Вывод:

— каждое из рассмотренных технических решений имеет свои преимущества и недостатки, поэтому выбор оптимальной системы охлаждения циклового воздуха энергетических ГТУ должен осуществляться в результате тщательного анализа климатических условий региона, технико-экономического анализа оборудования, расчета финансовой модели проекта и окупаемости проекта.

Мудр не тот, кто доказал что-либо,
а тот, кто, зная истину, не стал спорить
Конфуций

ГЛАВА 2

Оценка эффективности ОУ ИТ энергетической ГТУ SGT5–4000F ПГУ-450

2.1. Анализ инвестиционного проекта ОУ ИТ ГТУ

В течение нескольких лет в ПАО «Мосэнерго» проводилась научно-исследовательская работа, направленная на выбор оптимальной системы охлаждения циклового воздуха энергетических ГТУ для климатических условий Москвы. Были привлечены ведущие ученые Московского энергетического института, представители компаний, специализирующихся на реализации проектов с АБХМ, ДГА, с установками испарительного типа, производителями КБОУ ГТУ.

В процессе подготовки обоснований были проанализированы фактические режимы работы блоков ПГУ ПАО «Мосэнерго» за трехлетний период эксплуатации. С помощью архива Гидрометцентра выполнен анализ климатических условий Москвы и Московской области за последние 30 лет.

Для ознакомления на практике с этими технологиями сотрудники ПАО «Мосэнерго» изучали опыт эксплуатации ООО «ЛУКОЙЛ–Астраханьэнерго» энергоблоков ПГУ-110 и ПГУ-235 с установкой абсорбционных холодильных машин (АБХМ) для ГТУ LM6000 PF Sprint производства General Electric и ООО «ЛУКОЙЛ–Кубаньэнерго» на Краснодарской ТЭЦ, где эксплуатируется энергоблок ПГУ-410 с ГТУ M701F4 MHI (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd) с охладительной установкой воздуха испарительного типа.

В 2017 году после всестороннего изучения результатов научно-исследовательских работ, выполненных в ПАО «Мосэнерго», и посещения нашими сотрудниками действующих энергоблоков с различными системами снижения температуры циклового воздуха ГТУ было принято решение остановить свой выбор на охладительной установке воздуха испарительного типа (ОУ ИТ). Это обусловлено результатами технико-экономического анализа, показавшего относительно низкие капитальные затраты на реализацию данного проекта

и превалирование положительных показателей работы ОУ ИТ над ее отрицательным влиянием на работу ГТУ по сравнению с другими техническими решениями.

В табл. 2.1 представлены факторы, которые были учтены при выборе ОУ ИТ для ТЭЦ ПАО «Мосэнерго».

Таблица 2.1

Факторы, учитываемые при анализе применения ОУ ИТ ГТУ

Экономические	Технические и климатические
<ol style="list-style-type: none"> Капитальные затраты (приобретение, монтаж, введение в эксплуатацию); Эксплуатационные затраты (рост затрат на топливо, стоимость воды для ОУ ИТ и ее водоотвод, электропотребление насосов подачи воды, частота и стоимость замены орошаемого материала, регламентное обслуживание оборудования); Выручка за отпуск дополнительно выработанной электроэнергии на РСВ (рынок на сутки вперед); Снижение штрафов по Δ2.2 (снижение/увеличение максимальной/минимальной мощности, учтенное в РСВ); Показатели финансовой эффективности проекта (внутренняя норма доходности IRR, ставка дисконтирования, инвестиционная маржа, чистая приведенная стоимость NPV, дисконтированный срок окупаемости DPP, индекс доходности PI). 	<ol style="list-style-type: none"> Температура и относительная влажность воздуха Москвы; Оценка периода использования ОУ ИТ в течение года; Время и трудозатраты на монтаж, демонтаж, ремонт; Возможность использования химически очищенной (ХОВ), технической или водопроводной воды; Сезонное (май–сентябрь) увеличение потерь давления на всасе ГТУ из-за установки ОУ ИТ; Влияние повышенной влажности циклового воздуха ГТУ на воздушные фильтры КВОУ; Влияние повышенной влажности циклового воздуха ГТУ на состояние ее лопаточного аппарата; Влияние повышенной влажности на время использования ОУ ИТ; Рост расхода топливного газа от увеличения мощности ГТУ при включенной ОУ ИТ; Снижение ограничений мощности по Δ2.2; Дополнительная выработка электроэнергии от использования ОУ ИТ.

Для оценки эффективности инвестиционного проекта по внедрению ОУ ИТ на ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» был выполнен анализ его чувствительности, под которым понимается динамика трансформации результата в зависимости от изменения ключевых параметров.

Основными целевыми измеримыми показателями финансовой модели являются:

NPV (*чистая приведенная стоимость*). Основной показатель доходности инвестиционного объекта. Рассчитывается как разность общей суммы дисконтированных доходов и размера самой инвестиции и представляет собой прогнозную оценку экономического потенциала компании в случае принятия проекта.

IRR (*внутренняя норма доходности или прибыли*). Показывает максимальное требование к годовой прибыли на вложенные средства. Сколько инвестор может заложить в свои расчеты, чтобы проект стал привлекательным. Если внутренняя норма рентабельности выше дохода на капитал, то можно говорить об эффективности инвестиций.

DPP (*дисконтированный срок окупаемости*) — срок, требуемый для возврата вложенных инвестиций в проект за счет чистого денежного потока с учетом ставки дисконтирования.

Ставка дисконтирования — процентная ставка, используемая для пересчета будущих потоков доходов в единую величину текущей стоимости.

PI (*индекс рентабельности инвестиций*) рассчитывается как отношение суммы дисконтированных денежных потоков к первоначальным инвестициям. Если $PI > 1$, то проект следует принять, если $PI < 1$ — отвергнуть.

ОУ ИТ эксплуатируется по фактическим погодным условиям в период с мая по сентябрь, когда температура воздуха устанавливается выше $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$, а относительная влажность $RH \leq 80\%$.

Расчетное среднесуточное (с мая по сентябрь) значение снижения ограничений мощности блока ПГУ-420 составило 8,9 МВт; с учетом риска снижения эффекта по температурному фактору для расчетного моделирования принято значение 7 МВт. В результате анализа чувствительности инвестиционного проекта было установлено, что в случае использования ХОВ (химически очищенной воды) для ОУ ИТ дисконтный срок окупаемости проекта увеличится на 1,3 года и составит 9 лет по сравнению с подачей городской воды питьевого качества. Поэтому было решено использовать для ОУ ИТ на ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» городскую водопроводную воду. Следует отметить, что на Краснодарской ТЭЦ, где побывали сотрудники ПАО «Мосэнерго», на аналогичной ОУ ИТ питательная вода забирается из артезианских колодцев.

На рис. 2.1 представлена принципиальная схема работы ОУ ИТ без подачи ХОВ.

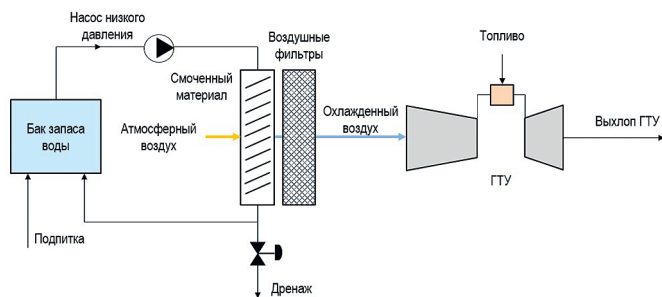


Рис. 2.1. Принципиальная схема работы ОУ ИТ на ТЭЦ-3 ПАО «Мосэнерго»

Корректировка окупаемости инвестиционного проекта была выполнена после первого сезона эксплуатации. По данным выгрузки архива параметров

из системы SPPAT-3000 блока ПГУ-450 были выполнены анализ работы и расчеты фактической эффективности ОУ ИТ за сезон 2019 г. Средняя величина снижения температурных ограничений мощности за время работы установки (суммарно около двух месяцев) составила 4,5 МВт. Этот результат оказался ниже расчетных значений, поскольку был обусловлен рядом факторов.

Основными факторами, оказавшими негативное влияние на эффективность ОУ ИТ в 2019 году, стали:

- Установка большую часть времени находилась в опытной эксплуатации для подтверждения заявленных изготовителем величин прироста располагаемой мощности энергоблока, а также построения корректировочных зависимостей увеличения мощности от температуры и относительной влажности наружного воздуха, макеты на ОРЭМ (оптовый рынок электроэнергии и мощности) подавались не на полную глубину охлаждения воздуха для снижения рисков получения штрафов.
- Более поздний по отношению к плановому срок ввода в эксплуатацию установки в результате чего она проработала всего 1315 часов из 3600 запланированных.
- Низкая температура наружного воздуха в период работы установки. Согласно данным Гидрометцентра, июль является самым теплым и самым дождливым месяцем в Москве. Однако в 2019 году среднемесячная температура наружного воздуха в июле составила всего 16,8 °С, что на 2,6 °С ниже средней температуры июля за всю историю наблюдений. По тем же данным, среднестатистическое количество дождливых дней в июле равно 12. А в 2019 году дождливых дней было 20, что существенно сказалось на значениях и продолжительности повышенной влажности воздуха.

Как показал опыт эксплуатации, использование ОУ ИТ в дождь средней и сильной интенсивности нецелесообразно, поскольку относительная влажность окружающей среды быстро достигает 85%, что ограничивает применение установки.

На основе полученных и проанализированных результатов эксплуатации ОУ ИТ в 2019 году была выполнена оценка проекта по пессимистическому сценарию. Показатель NPV (чистая приведенная стоимость) проекта остается положительным, но дисконтированный срок окупаемости DPP увеличится по отношению к плановому и составит 12,9 лет.

Выводы:

- в зависимости от климатических условий эксплуатации ОУ ИТ ГТУ (благоприятных или нет) маржинальная часть инвестиционного проекта корректируется в большую или меньшую сторону;
- корректировку окупаемости инвестиционных проектов целесообразно проводить ежегодно по результатам эксплуатации.

2.2. Оценка эффективности ОУ ИТ на ПГУ ТЭЦ ПАО «Мосэнерго»

В рамках реализации пилотного проекта повышения мощности ГТУ за счет снижения температуры наружного воздуха 5 июня 2019 года ОУ ИТ была введена в эксплуатацию на энергоблоке ПГУ-450 ТЭЦ-3 ПАО «Мосэнерго»

В мае 2020 года в строй была введена ОУ ИТ для SGT5–4000F энергоблока ПГУ-420 на ТЭЦ-2 ПАО «Мосэнерго», аналогичная установке ТЭЦ-3. Отличие только в том, что установка на ТЭЦ-3 находится в закрытом помещении, а на ТЭЦ-2 — на крыше машинного зала. Размещена на открытом воздухе и ОУ ИТ ГТЭ-160, введенная в эксплуатацию в 2021 году на ПГУ-230 ТЭЦ-1 ПАО «Мосэнерго».

На *фото 2.2* изображена ОУ ИТ (выделена красным цветом), присоединенная к КВОУ ГТУ SGT5–4000F, имеющему трехсторонний всас воздуха на трех его ярусах. Таким образом, на каждом ярусе перед КВОУ устанавливается один модуль ОУ ИТ, а на всех всасах и ярусах — девять модулей.

Первоначально КВОУ имело погодные козырьки, снижающие попадание дождя и снега внутрь. Однако ввиду размещения КВОУ внутри помещения было решено установить ОУ ИТ на месте погодных козырьков.



Фото 2.2. Общий вид ОУ ИТ в помещении КВОУ на блоке ПГУ-450 ТЭЦ-3 [1]

Принцип работы ОУ ИТ заключается в снижении температуры всасываемого воздуха перед КВОУ ГТУ за счет его увлажнения подаваемой водой. Процесс охлаждения циклового воздуха ГТУ в этой схеме близок к адиабатическому. Снижение температуры воздуха сопровождается повышением

его плотности, а следовательно, и массового расхода, поступающего в ГТУ. Таким образом, в результате снижения температуры всасываемого наружного воздуха можно увеличить расход топлива в КС и тем самым повысить вырабатываемую мощность.

В зависимости от температуры и относительной влажности атмосферного воздуха водопроводная вода одним или двумя насосами низкого давления подается из бака в раздающий коллектор ОУ ИТ независимо по всем всасам и ярусам КВОУ ГТУ, после чего стекает по пористому материалу в дренажную систему и возвращается обратно в бак (рис. 2.3).

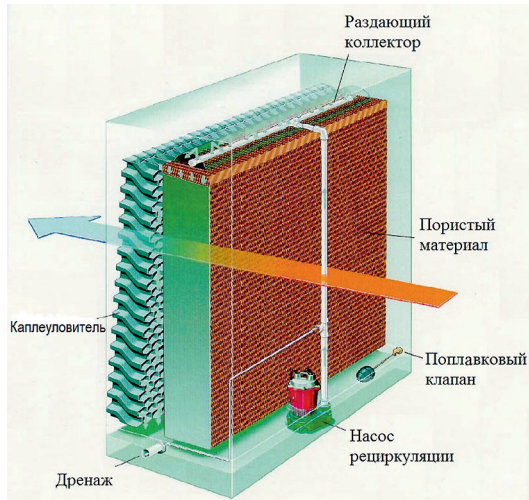


Рис. 2.3. Модуль ОУИТ [1]

Объем подаваемой цикловой воды должен быть по меньшей мере в два раза больше объема испаряемой воды. Максимальный расход воды устанавливается регулирующим краном. Наличие воды в баке во время работы ОУ ИТ контролируется поплавковым датчиком уровня.

При испарении содержащиеся в воде минеральные вещества и соли остаются в системе, что приводит к повышению их концентрации и электропроводимости оборотной воды. Для ограничения уровня проводимости и предотвращения образования твердого осадка на поверхности орошаемого пористого материала ее качество контролируется кондуктометрическим анализом. При достижении предельных значений электропроводимости запускается процесс слива из бака воды с высоким содержанием минеральных веществ и пополнения системы свежей водой. Для дезинфекции цикловой воды рекомендуется использовать биоцид (50% раствор гидроксида).

При падении температуры наружного воздуха ниже $+6^{\circ}\text{C}$ открывается система слива воды из трубопроводов и бака для предотвращения их размораживания.

Атмосферный воздух, проходя через пористый материал, насыщается влагой более чем на 90% и охлаждается. Часть влаги испаряется, другая ее часть, не удаленная через систему дренажей, уносится с потоком воздуха. Для уменьшения количества взвешенной влаги, поступающей на воздушные фильтры КВОУ и вход ГТУ, за пористым смачиваемым материалом устанавливается каплеуловитель, входящий в состав ОУ ИТ.

В момент первого включения ОУ ИТ при температуре наружного воздуха $18,5^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности 51% температура воздуха на входе в компрессор снизилась на 4°C , до $14,5^{\circ}\text{C}$, что привело к увеличению мощности энергоблока на 11 МВт для выдерживания графика нагрузки энергосистемы.

В рамках проведения испытаний по программе Системного оператора (услуги НППЧ — нормированное первичное регулирование частоты) 20.06.2019 при температуре наружного воздуха 29°C и относительной влажности воздуха $\text{RH} = 24\%$ температура за ОУ ИТ снижалась на $9,7^{\circ}\text{C}$, а при ее отключении мощность энергоблока снизилась на 19 МВт.

На зимний период ОУ ИТ была отключена 15.09.2019 по фактическим погодным условиям, кассеты из пористого материала и каплеуловители влаги были демонтированы. С 5 июня по 15 сентября 2019 года ОУ ИТ проработала 1315 часов.

Состояние испарительных кассет ОУ ИТ ТЭЦ-3 через 1315 часов эксплуатации представлено на *фото 2.4*. На фронтальной части материала кассет видны отложения белого цвета [1].

После окончания сезона эксплуатации ОУ ИТ на ТЭЦ-3 (при среднесуточной температуре воздуха не выше $+12^{\circ}\text{C}$) было проверено состояние лопаточного аппарата и проточной части осевого компрессора ГТУ Siemens SGT5–4000F. В результате осмотра установлено отсутствие каких-либо коррозионных или эрозионных повреждений статорных и роторных лопаток, а лопаточный аппарат и проточная часть компрессора находились в рабочем состоянии. На *фото 2.5* показано состояние входного направляющего аппарата (ВНА) осевого компрессора ГТУ.

Опытная эксплуатация ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ-3 в полном объеме началась в весенне-летний период 2020 года. В это время проводились тепловые испытания работающей по диспетчерскому графику нагрузок ПГУ с целью определения эффективности ОУ ИТ при различной температуре и относительной влажности наружного воздуха.

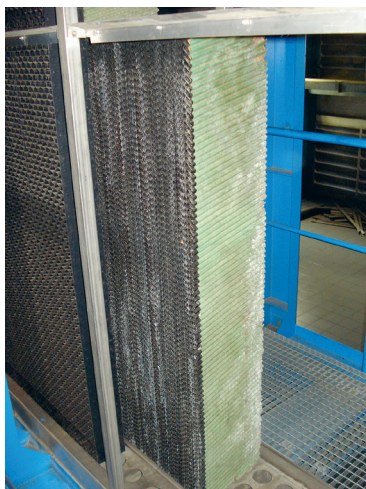


Фото 2.4. Состояние кассет ОУ ИТ

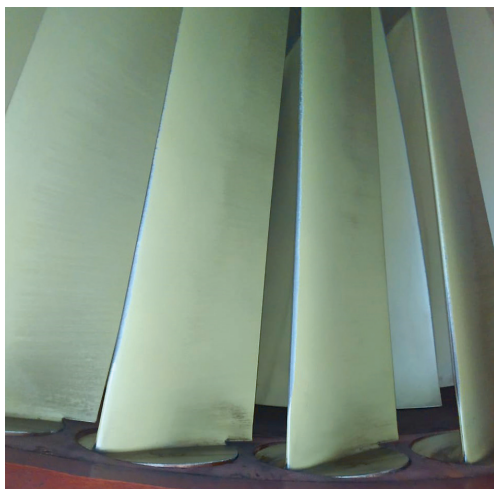


Фото 2.5. Состояние лопаток ВНА ГТУ

Положение ВНА осевого компрессора ГТУ при этом варьировалось от 15 до 85% (следует отметить, что блок эксплуатировался в режиме НПРЧ).

Прирост мощности ГТУ SGT5 4000F при работе ОУ ИТ определяется как разность располагаемой мощности при параметрах воздуха до и после испарительных охладителей. Расчетное увеличение мощности ГТУ для $N_z = 276$ МВт и эффективности охлаждения $E = 0,9$ при работе ОУ ИТ представлены в табл. 2.3.

Параметры воздуха после испарительных охладителей определяются эффективностью охлаждения и снижением температуры воздуха.

Снижение температуры воздуха в ОУ ИТ определяется как разность температур наружного воздуха до и после ОУ ИТ [2]:

$$\Delta t = t_n - t_b,$$

где:

Δt — снижение температуры воздуха в ОУ ИТ, °С;

t_n — температура воздуха до ОУ ИТ (температура наружного воздуха), °С;

t_b — температура воздуха после ОУ ИТ, °С.

Определение температуры воздуха по мокрому термометру производится по h - d -диаграмме для адиабатического охлаждения ($h = \text{const}$). На рис. 2.6 представлена номограмма для определения температуры охлаждения воздуха в ОУ ИТ ГТУ в зависимости от температуры и относительной влажности атмосферного воздуха для ТЭЦ-3.

Таблица 2.3

Расчетное увеличение мощности ГТУ (МВт)

Температура, °С	Влажность, %								
	30	40	50	60	70	80	90	95	100
10	9,2	7,7	6,1	4,7	3,4	2,1	0,9	0	0
11	9,5	7,9	6,2	4,8	3,5	2,2	0,9	0	0
12	9,7	8,1	6,4	4,9	3,5	2,2	0,9	0	0
13	10,0	8,3	6,6	5,1	3,6	2,2	0,9	0	0
14	10,3	8,4	6,8	5,2	3,7	2,3	1,0	0	0
15	10,7	8,7	7,0	5,4	3,9	2,4	1,0	0	0
16	11,1	9,1	7,3	5,7	4,1	2,6	1,1	0	0
17	11,5	9,4	7,6	5,9	4,3	2,7	1,2	0	0
18	11,8	9,8	8,0	6,2	4,5	2,9	1,3	0	0
19	12,3	10,2	8,3	6,5	4,7	3,0	1,4	0	0
20	12,8	10,7	8,7	6,8	5,0	3,2	1,5	0	0
21	13,4	11,1	9,1	7,1	5,2	3,4	1,7	0	0
22	13,9	11,6	9,5	7,4	5,5	3,6	1,8	0	0
23	14,5	12,1	9,9	7,8	5,8	3,8	2,0	0	0
24	15,1	12,7	10,3	8,1	6,1	4,0	2,1	0	0
25	15,8	13,2	10,8	8,5	6,4	4,3	2,3	0	0
26	16,4	13,8	11,3	8,9	6,7	4,5	2,4	0	0
27	17,1	14,3	11,8	9,3	7,0	4,7	2,6	0	0
28	17,8	14,9	12,2	9,7	7,3	5,0	2,7	0	0
29	18,5	15,5	12,7	10,1	7,6	5,2	2,9	0	0
30	19,2	16,1	13,3	10,5	7,9	5,4	3,1	0	0

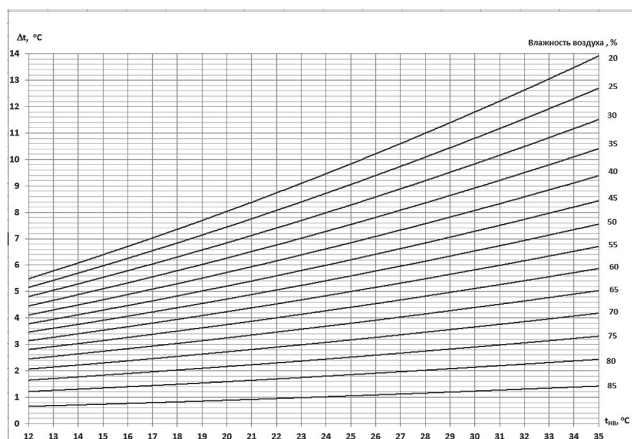


Рис. 2.6. Номограмма охлаждения воздуха в ОУ ИТ ГТУ в зависимости от температуры и относительной влажности атмосферного воздуха (Копин А.А.)

Важно отметить, что по прошествии семи лет эксплуатации ОУ ИТ ГТУ на ТЭЦ-3 номограмма, приведенная на *рис. 2.6*, не потеряла своей актуальности и продолжает с доверительной вероятностью 95% подтверждать получаемые результаты.

При температуре атмосферного воздуха $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности 50% фактическое снижение температуры воздуха на входе в компрессор составляет $5,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это приводит к реальному увеличению мощности ГТУ на 10 МВт, а блока ПГУ-450 — на 11 МВт (*рис. 2.7*).

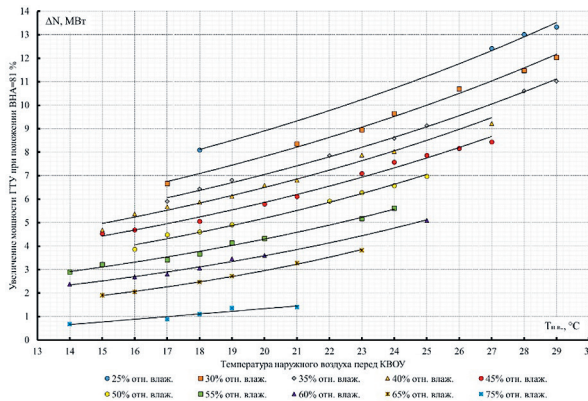


Рис. 2.7. Изменение мощности ГТУ от температуры и относительной влажности наружного воздуха перед КВОУ [2]

При увеличении мощности ГТУ соответственно увеличивается расход пара по всем трем контурам паровой турбины, но при этом уменьшаются его температура и внутренний относительный КПД части высокого (ЧВД) и среднего (ЧСД) давления. Однако расход пара перекрывает это уменьшение, и при давлении в конденсаторе 0,05 бар в конденсационном режиме работы ПТ прирост ее мощности от увеличения мощности ГТУ составляет примерно 1 МВт.

Испытания, проведенные на ТЭЦ-2, показали аналогичные результаты зависимости приращения мощности ГТУ от температуры наружного воздуха и его относительной влажности, как и на ТЭЦ-3. На ТЭЦ-1 при сходных климатических условиях прирост мощности ПГУ при работе ОУ ИТ составил около 5 МВт (ГТУ — 4,5 МВт, ПТ — 0,5 МВт).

Эффективность использования ОУ ИТ в составе ГТУ ограничивается затратами энергии на собственные нужды, в которые входят потребление электроэнергии, водоподготовка, водопотребление и водоотведение, а также затраты на обслуживание (установка и демонтаж кассет охлаждения, чистка москитных сеток) и ремонт (замена испарительных кассет, каплеуловителей, закупка биоцида и т.д.). Необходимо отметить, что при увеличении

мощности ГТУ увеличивается потребление топлива, что также нужно учитывать в затратах на собственные нужды. Фактический диапазон эффективного использования ОУ ИТ ГТУ представлен на *рис. 2.8*.

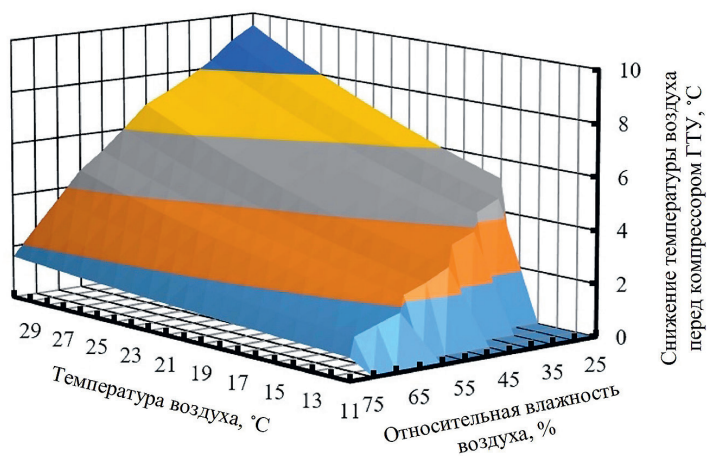


Рис. 2.8. Фактический диапазон эффективного использования ОУ ИТ ГТУ [2]

К таким режимам можно отнести области температур наружного воздуха больше 15 °С и относительной влажности воздуха менее 65%. При этом мощность ПГУ может возрасти более чем на 6 МВт, КПД ГТУ увеличивается на 0,27–0,31%, а КПД ПГУ — на 0,35–0,39%.

Выводы:

- основной прирост мощности блоков ПГУ при работе ОУ ИТ происходит за счет увеличения мощности ГТУ. Влияние ПТ на мощность ограничивается 10%:
- фактический диапазон эффективного использования ОУ ИТ ГТУ ограничивается величиной затрат энергии на собственные нужды.

О, сколько нам открытий чудных
Готовят просвещения дух
И опыт, сын ошибок трудных...
А. С. Пушкин

ГЛАВА 3

Мониторинг параметров циклового воздуха энергетических ГТУ с ОУ ИТ

В процессе эксплуатации ГТУ в различных климатических условиях отмечается рост перепада давления в системах фильтрации циклового воздуха при повышении влажности окружающей среды [1]. Это отчетливо прослеживается при сравнении трендов перепада давления на фильтрах КВОУ при работе ГТУ во время атмосферных осадков и без них.

Актуальность этой темы возросла в связи с применением в ПАО «Мосэнерго» охлаждающих установок воздуха испарительного типа (ОУ ИТ) перед КВОУ ГТУ [2]. Принцип работы ОУ ИТ заключается в снижении температуры всасываемого воздуха перед КВОУ ГТУ за счет его увлажнения подаваемой цикловой водой через раздающий коллектор (рис. 3.1).

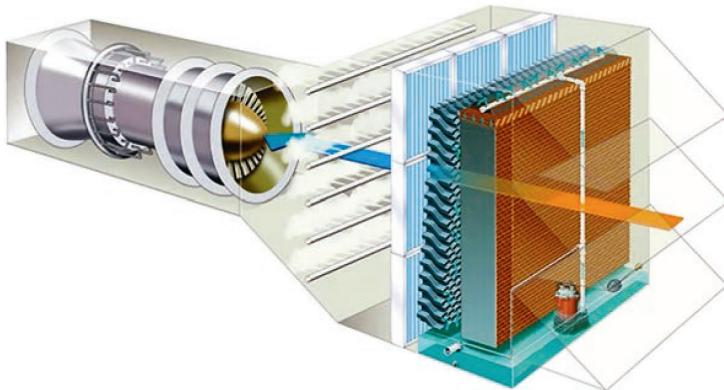


Рис. 3.1. Схема охлаждения циклового воздуха ГТУ с помощью ОУ ИТ (clck.ru/34NvF5)

Первый год эксплуатации такой установки (2019-й) показал, что каплеуловители влаги, поставляемые в комплекте с ОУ ИТ компании Munters GmbH и установленные за кассетами из пористого материала TURBOdek, не справляются с полным удалением дополнительно поступающей на них воды. Влага, не испарившаяся и не отведенная каплеуловителями в систему дренажа, вместе с потоком воздуха устремляется на воздушные фильтры КВОУ, снижая их эффективность и повышая перепад давления.

Система очистки циклового воздуха ГТУ на ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3, на которых установлены ОУ ИТ, состоит из трех ступеней: на первой ступени установлены панельные фильтры-коагуляторы класса G4, на второй и третьей последовательно размещены фильтры тонкой очистки (ФТО) классов F8 и E10. Особенностью размещения этих фильтров в КВОУ является установка ФТО F8 реверсно по отношению к E10. В результате V-карманы кассетных фильтров F8 с защитными сетками фильтровального материала направлены не вверх, а вниз по потоку в сторону фильтров-коагуляторов класса G4.

На *рис. 3.2* представлены тренды изменения относительной влажности (RH) окружающей среды и перепада давления на фильтрах тонкой очистки класса F8 (вторая ступень очистки воздуха) КВОУ ТЭЦ-3 при работающей ОУ ИТ с 26 по 28 июня 2019 года. ОУ ИТ находилась в процессе испытаний на различных режимах работы ГТУ, поэтому не выключалась даже во время сильного и продолжительного дождя.

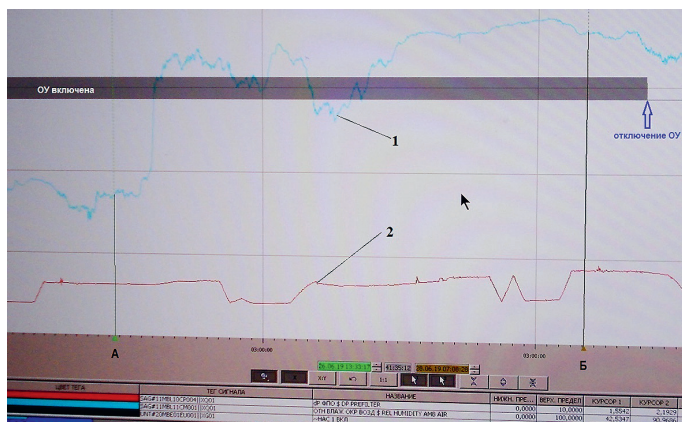


Рис. 3.2. Тренды изменения: 1 – относительной влажности воздуха окружающей среды; 2 – перепада давления на фильтрах тонкой очистки класса F8 при работающей ОУ ИТ

С ростом относительной влажности с 42,53% в сухую погоду (курсор А) до 90,96% (курсор Б) во время работы ОУ ИТ при дожде перепад давления на фильтрах класса F8 вырос на 0,6387 мбар, или на 63,87 Па.

Фильтры тонкой очистки класса F, согласно ГОСТ Р И 779–2014, имеют величину предельно допустимого перепада давления 450 Па. Таким образом,

увеличение относительной влажности воздуха на 48,43% приводит к сокращению жизненного цикла фильтров на 14,2%. На КБОУ ТЭЦ-3 таких фильтров установлено 540 штук. С учетом цены одного фильтра тонкой очистки класса F8 затраты на закупку одного комплекта из 540 фильтров могут составить несколько миллионов рублей. Цена сокращения жизненного цикла фильтров класса F8 на 14,2% менее чем за двое суток (39,5 часов) может быть внушительной. Кроме того, рост перепада давления на фильтрах КБОУ на 50 Па ведет в среднем к недовыработке ГТУ 0,1% электроэнергии (в нашем случае 0,12%). Для поддержания диспетчерского графика выработки электроэнергии операторы блочного щита управления (БЩУ) вынуждены будут повышать расход топливного газа для ГТУ, что неминуемо ведет к финансовым потерям.

Следует добавить, что при намокании фильтровального материала эффективность воздушных фильтров по улавливанию пыли резко снижается и становится соизмеримой с фильтрами более низкого класса очистки (рис. 3.3). В результате этого в проточную часть осевого компрессора поступает большее количество пыли. Численно показать значимость этого физического процесса можно с помощью методики расчета, предлагаемой производителем ГТУ.

В табл. 3.1 представлены результаты расчета проникновения пыли через систему фильтрации циклового воздуха одной и той же ГТУ, но с различными классами очистки по ступеням КБОУ, приведенные в бюллетене компании Siemens AB «Improvement of air filter efficiency» [3].

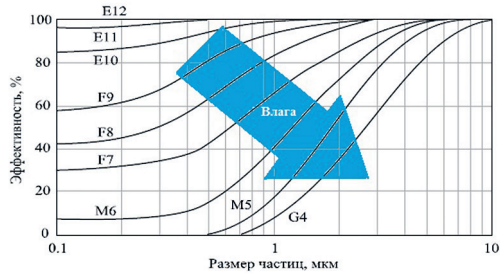


Рис. 3.3. Влияние атмосферной влаги на эффективность воздушных фильтров [1]

Таблица 3.1

Оценка проникновения пыли через систему фильтрации с различным сочетанием классов очистки по ступеням

Размер частиц, мкм	Кол-во частиц в воздухе на промышленной территории, 1/м ³	Система фильтрации G4+G4+F8		Система фильтрации G4+F7+E10	
		Начальная эффективность, %	Кол-во проникающих частиц, 1/м ³	Начальная эффективность, %	Кол-во проникающих частиц, 1/м ³
0,3–0,5	20 000 000	88,20	2265600	95,70	161 818
0,5–1,0	4 000 000	94,20	197 200	98,25	6783
1,0–2,0	300 000	97,55	5733	99,99	1

Из таблицы видно, что количество пыли, проникающее в проточную часть ГТУ с более низкими классами очистки (G4+G4+F8), в 14 раз выше, чем с фильтрами более высокой эффективности.

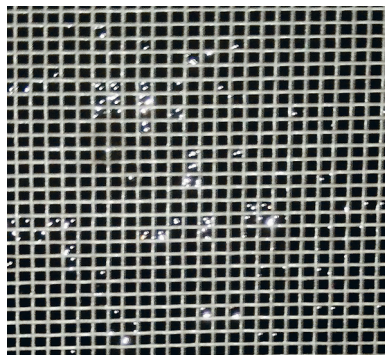


Фото 3.4. Капли влаги на защитной сетке фильтров ФТО F8 при работающей ОУ ИТ

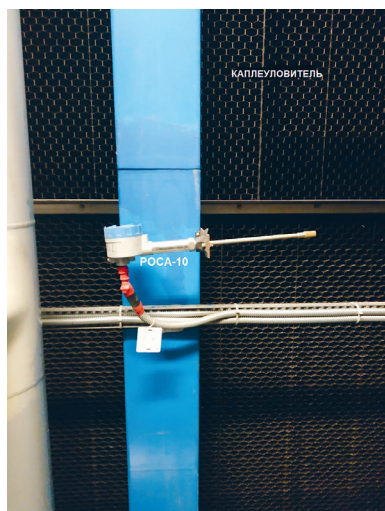


Фото 3.5. Измерительный преобразователь температуры и влажности воздуха за каплеуловителем ОУ ИТ ГТУ

Для снижения влияния влажности воздуха на работу воздушных фильтров КВОУ и ГТУ на первых ступенях систем очистки воздуха устанавливаются фильтры-коагуляторы. Как показал опыт эксплуатации ОУ ИТ, штатные фильтры-коагуляторы, применяемые на КВОУ ГТУ ТЭЦ-3, не в полной мере обеспечивают очистку воздушного потока, насыщенного таким количеством жидких аэрозолей. При обследовании ФТО класса F8, установленных за фильтрами-коагуляторами, были обнаружены капли влаги, закрепившиеся на синтетических нитях защитных сеток их фильтровального материала, что объясняет повышение перепада давления на этих фильтрах (фото 3.4).

Для оценки эффективности охлаждения атмосферного воздуха в ОУ ИТ за ее каплеуловителями на трех всасах КВОУ установлены штатные измерительные преобразователи температуры и влажности «РОСА-10» (фото 3.5). При сравнении показаний этих приборов с показаниями метеостанции, установленной на площадке обслуживания второго яруса КВОУ ГТУ, определяется насыщение влагой воздушного потока и эффективность (глубина) его охлаждения. Таким образом, мониторинг влажности циклового воздуха ГТУ заканчивается за ОУ ИТ.

Как меняется влажность рабочего тела вниз по потоку, как она влияет на фильтры КВОУ и работу ГТУ, остается неизвестным.

Датчики давления, показывая перепад давления на фильтрах, дают интегральную характеристику изменения их состояния, которая обусловлена как намоканием, так и загрязнением фильтр-элементов.

Для мониторинга параметров циклового воздуха на всасе ГТУ, оценки влияния относительной влажности на работу воздушных фильтров с целью оптимизации жизненного цикла и затрат на их закупку, а также на состояние облопачивания осевого компрессора и выработку мощности

турбомашины было реализовано следующее техническое решение: установить по одному измерительному преобразователю температуры и влажности «РОСА-10» за фильтрами-коагуляторами на втором ярусе трех всасов КВОУ (так же, как на ОУ ИТ) и один прибор в воздуховоде, как показано на продольном разрезе воздухозаборного тракта (ВЗТ) ГТУ ТЭЦ-3 на *рис. 3.6*. Выходные сигналы приборов «РОСА-10» были заведены в систему АСУ ТП ГТУ.

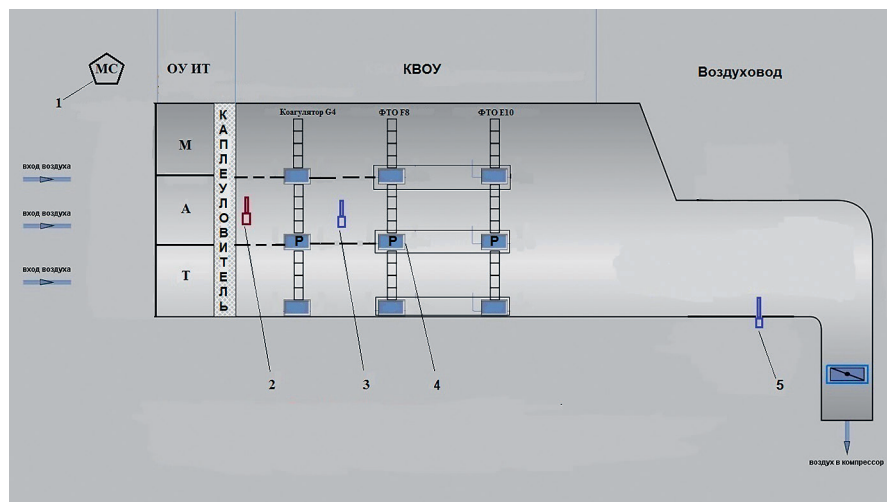


Рис. 3.6. Схема расположения приборов «РОСА-10» в ВЗТ ГТУ ТЭЦ-3:
 1 – метеостанция на КВОУ; 2 – штатный прибор за ОУ ИТ;
 3 – вновь установленный прибор за фильтрами-коагуляторами КВОУ;
 4 – датчики давления;
 5 – вновь установленный прибор в воздуховоде к ГТУ

Такое количество и расположение приборов «РОСА-10» оптимально для КВОУ, имеющих просечные покрытия между ярусами (прерывистые линии на *рис. 3.6*), что не приведет к искажению значений температуры и влажности по высоте ВЗТ.

На *фото 3.7* изображены установленные в ВЗТ ГТУ ТЭЦ-3 измерительные преобразователи температуры и влажности «РОСА-10» за фильтрами-коагуляторами (перед ФТО F8) и в воздуховоде. Это техническое решение позволило оценить эффективность сепараторов влаги ОУ ИТ и фильтров КВОУ для предотвращения попадания влаги в проточную часть ГТУ. Другими словами, появилась возможность определить, на каком участке прохождения циклового воздуха через систему воздухоочистки заканчивается влияние относительной влажности на работу ГТУ и начинается преобладающее влияние пониженной температуры воздуха.



а)



б)

Фото 3.7. Измерительный преобразователь температуры и влажности воздуха «РОСА-10»:

а) за фильтрами-коагуляторами класса G4 в КВОУ; б) в воздуховоде к ГТУ

Эти знания позволяют подбирать более эффективные фильтры-коагуляторы КВОУ, увеличивая жизненный цикл фильтров второй и третьей ступени, а также воздействовать на относительную влажность, уменьшая ее влияние на эффективность работы ГТУ.

На рис. 3.8 представлены результаты изменения температуры и относительной влажности воздуха от центрального входного сечения ОУ ИТ до всаса в осевой компрессор ГТУ по длине проточной части ВЗТ. Относительная влажность воздуха за ОУ ИТ увеличилась на 80%, а температура снизилась на 3,7 °С. Как показали результаты замеров, тренд изменения температуры циклового воздуха при прохождении системы фильтрации КВОУ ГТУ практически остается постоянным и равным значению за ОУ ИТ.

Изменение относительной влажности воздуха по проточной части ВЗТ после ОУ ИТ имеет устойчивый нисходящий тренд. Коагуляторы класса G4 системы фильтрации КВОУ снизили RH на 10%, что не так много для влагоотделителей. Снижение относительной влажности за второй и третьей ступенями воздухоочистки (ФТО F8 + E10), а также в воздуховоде более значительное и составляет уже 24% по сравнению с замерами после коагуляторов.

Суммарная эффективность системы очистки воздуха КВОУ по снижению относительной влажности воздуха после ОУ ИТ составила 34%. Несмотря на это, влажность циклового воздуха на всасе в компрессор ГТУ на 10% выше, чем на входе в ОУ ИТ. Снижение температуры воздуха на 3,7 °С привело к росту выходной мощности ГТУ на 7 МВт.

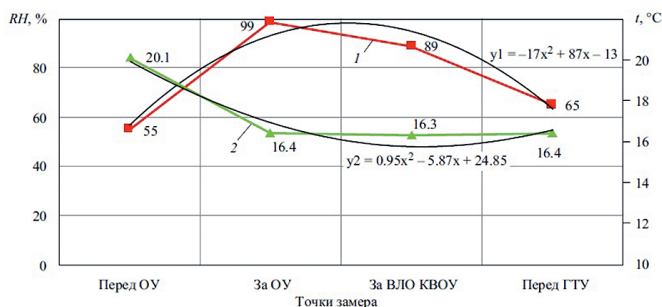
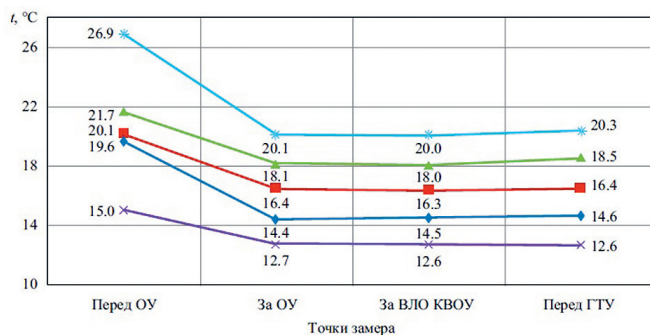


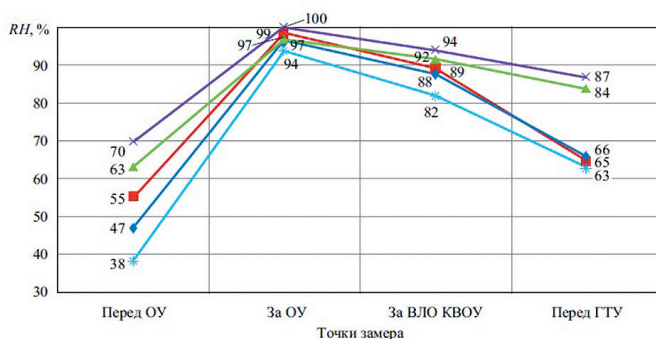
Рис. 3.8. Изменение относительной влажности (1) и температуры воздуха (2) по проточной части ВЗТ ГТУ ТЭЦ-3

Тренды изменения температуры и относительной влажности воздуха от входа в ОУ ИТ до всаса в осевой компрессор ГТУ можно описать с помощью полиномиальных уравнений, которые применимы при расчетах прогнозируемой влажности за ступенями фильтрации КВОУ и температуры на всасе в осевой компрессор ГТУ. На рис. 3.9 приведены результаты некоторых замеров изменения температуры и относительной влажности воздуха по проточной части ВЗТ ТЭЦ-3 в июле–августе 2020 года. На рис. 3.9а видно, что температура воздуха за ОУ ИТ в зависимости от температуры окружающей среды снижается на 2,2...6,8 °C. Из графиков следует, что чем выше температура наружного воздуха, тем выше эффективность его охлаждения в ОУ ИТ.

Обращает на себя внимание тот факт, что температура циклового воздуха на всасе в осевой компрессор повышается на 0,2...0,4 °C по сравнению со значениями после ОУ ИТ. Это явление на данном этапе исследований можно объяснить небольшими присосами теплого воздуха в воздухопровод из машинного цеха.



а)



б)

Рис. 3.9. Изменение параметров воздуха по проточной части ВЗТ ГТУ ТЭЦ-3 в июле-августе 2020 года: а) температуры; б) относительной влажности

На рис. 3.9б изображены тренды изменения относительной влажности воздуха по проходному сечению всего ВЗТ от входа в ОУ ИТ и кончая всасом в осевой компрессор ГТУ. С ростом относительной влажности окружающей среды увеличивается и RH за ОУ ИТ, достигая 100%. После ОУ ИТ тренд относительной влажности по проточной части ВЗТ имеет нисходящий характер. Чем выше относительная влажность за ОУ ИТ, тем меньшее снижение RH наблюдается за коагуляторами КВОУ. При относительной влажности окружающей среды выше 60% на всасе в осевой компрессор ГТУ $RH > 80\%$. При меньшей относительной влажности воздуха на входе в ОУ ИТ значения RH на всасе ГТУ находятся в диапазоне 60–70%.

Июль в Москве является самым жарким, но одновременно и самым дождливым месяцем. Опыт эксплуатации ОУ ИТ в 2020 году показал, что в ночное время работа установки малоэффективна, так как влажность воздуха быстро растет и превышает 80%, а температура снижается до 10–15 °С. Другим фактором, влияющим на коэффициент использования ОУ ИТ, являются атмосферные осадки в виде дождя или тумана. В процессе эксплуатации было установлено, что кратковременные осадки практически не оказывают влияния на работу ОУ ИТ. При затяжных осадках обычно через 15–20 минут после их начала происходит резкое увеличение относительной влажности воздуха выше 80%, а также снижение его температуры (рис. 3.2), что ограничивает применение ОУ ИТ.

Результаты мониторинга показывают, что при работающей ОУ ИТ относительная влажность перед осевым компрессором ГТУ всегда выше значений RH окружающей среды. Для снижения негативного влияния влажности воздуха на эффективность воздушных фильтров и проточную часть турбомашин целесообразно формировать систему очистки циклового воздуха в КВОУ энергетических ГТУ с ОУ ИТ водостойкими фильтр-элементами. Эта же проблема существует при работе ГТУ вблизи башенных, вентиляторных градирен, водоемов, а также в прибрежных (onshore) и морских (offshore)

условиях. Вопрос необходимости включения требования по определению водостойкости воздушных фильтров для ГТУ в российский стандарт авторы поднимали в работе [4]. В 2022 году вышло первое издание второй части стандарта ISO 29461–2021 Air intake filter systems for rotary machinery. Test methods — «Часть 2: Тестирование фильтров на устойчивость в условиях тумана и туманной среды».

Опыт реверсной установки фильтров тонкой очистки при использовании ОУ ИТ показал, что защитная сетка фильтровального материала должна находиться не на внешней стороне ФТО, а на внутренней (чистой стороне воздуха), как это было рекомендовано в статье [5]. При замене фильтров тонкой очистки класса F8 с защитной сеткой на внешней стороне V-образных карманов на ФТО такого же класса, но с защитной сеткой на чистой стороне фильтров проблема оседания влаги в виде капель на защите фильтровального материала перестала существовать.

Для оценки изменения количества аэрозолей по проточной части ВЗТ при работе ОУ ИТ были использованы счетчики частиц, которые длительное время применяются в ПАО «Мосэнерго» для мониторинга загрязненности воздуха [1]. Замеры воздуха осуществлялись как перед, так и за ОУ ИТ, за фильтрами-коагуляторами КВОУ и на «чистой» стороне воздуха (за системой фильтрации) в воздуховоде к осевому компрессору ГТУ.

На рис. 3.10 представлены результаты замеров изменения общего количества частиц и процентного отношения мелкодисперсных аэрозолей (0,3–0,5 мкм) в кубометре воздуха по проточной части ВЗТ ГТУ ТЭЦ-3, выполненных на втором ярусе центрального всаса. Как видно из трендов, общее количество аэрозолей за ОУ ИТ увеличилось на 23,8% по сравнению с окружающей средой. При этом количество мелкодисперсных частиц возросло незначительно. Несмотря на это, изменение количества мелкодисперсных аэрозолей по проточной части ВЗТ имеет медленно восходящий тренд, достигающий своего максимального значения перед всасом в осевой компрессор ГТУ.

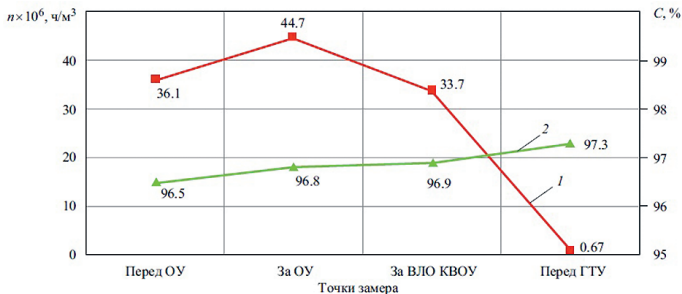


Рис. 3.10. Изменение общего количества частиц и процентное отношение мелкодисперсных аэрозолей по проточной части ВЗТ ГТУ ТЭЦ-3: 1 — общее количество частиц; 2 — процентное отношение мелкодисперсных аэрозолей

За фильтрами-коагуляторами КВОУ общее количество аэрозолей снизилось на 32,6% по сравнению со значением за ОУ ИТ. Фильтры класса G4 не предназначены для очистки воздуха от мелкодисперсных частиц, поэтому процентное содержание частиц размером 0,3–0,5 мкм за ними выросло незначительно. После прохождения циклового воздуха ГТУ через вторую и третью ступени фильтрации КВОУ (F8+E10) общее количество частиц перед осевым компрессором ГТУ было снижено в 66,7 раза по сравнению с количеством аэрозолей после ОУ ИТ.

Конструктивно КВОУ ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 имеют три яруса и три всаса. Их отличие состоит в том, что КВОУ (и ОУ ИТ) ТЭЦ-3 расположено в помещении корпуса ПГУ-450 и не имеет погодных козырьков (рис. 2.2). КВОУ с ОУ ИТ (более темный синий цвет) на ТЭЦ 2 установлено в открытом пространстве на крыше здания блока ПГУ-420 (фото 3.11).



Фото 3.11. Внешний вид ВЗТ ТЭЦ-2 с ОУ ИТ

Представляет интерес вопрос, как меняется количество аэрозолей в проточной части ВЗТ по всасам и ярусам КВОУ ГТУ при работающей ОУ ИТ. На рис. 3.12 приведены тренды изменения общего количества частиц в кубометре воздуха по всем всасам ВЗТ ГТУ ТЭЦ-2 при работающей ОУ ИТ, замеренные 30.07.2020 на третьем ярусе.

Как видно из приведенных графиков, тенденции изменения данного параметра воздуха по ВЗТ на ТЭЦ-2 идентичны картине, полученной на ТЭЦ-3.

Отличие в загрязненности атмосферного воздуха на разных всасах обусловлено соответствующей ориентацией ВЗТ ГТУ относительно «розы ветров». Количество аэрозолей за ОУ ИТ зависит не только от параметров атмосферного воздуха, поступающего в ОУ ИТ, но и от количества питательной воды, подаваемой циркуляционным насосом на каждую ее секцию. Согласно инструкции по эксплуатации ОУ ИТ ТЭЦ-3, наименьшее количество питательной воды подается на центральную секцию, а максимальное — на левую секцию

ОУ ИТ (на 37,5% больше, чем на центральную и на 15,8% больше, чем на правую часть). На ТЭЦ-2 настройка подачи воды другая: наибольшее количество питательной воды подается на центральную секцию ОУ ИТ, а наименьшее — на левую сторону. Такое распределение подачи цикловой воды обусловлено тем, что центральная и правая секции ОУ ИТ большую часть летнего периода эксплуатации находятся на солнечной стороне, где испарение влаги происходит более интенсивно.

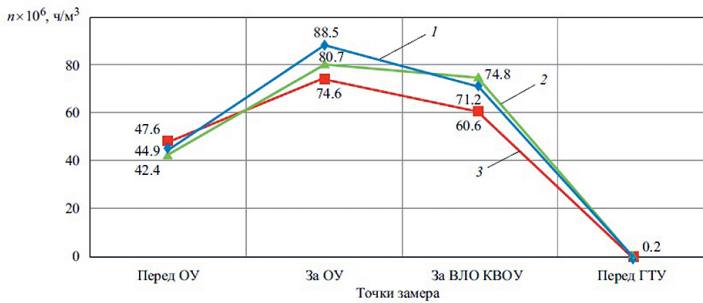


Рис. 3.12. Изменение количества частиц на третьем ярусе по всем всасам ВЗТ ТЭЦ-2 при работающей ОУ ИТ 30.07.2020:
1 — центральный всас; 2 — правый всас; 3 — левый всас

Результаты замеров в полной мере иллюстрируют регулирование подачи циркуляционной воды по секциям ОУ ИТ. Наибольшее количество аэрозолей зафиксировано за центральной секцией ОУ ИТ, а наименьшее — за левой секцией. Правая секция занимает промежуточное положение между ними по количеству аэрозолей. Обращает на себя внимание значительный рост количества частиц за секциями ОУ ИТ по сравнению с фоном окружающей среды. Так, за центральной секцией отмечен рост аэрозолей на 97,1%, за правой — на 90,3%, а за левой — на 56,7%.

Эффективность фильтров-коагуляторов КВОУ по удалению аэрозолей за ОУ ИТ составила на центральном всасе КВОУ — 24,3%, на правом — 7,9%, а на левом — 23,1%. Вторая и третья ступени фильтрации КВОУ завершают очистку циклового воздуха ГТУ.

На рис. 3.13 приведено изменение общего количества частиц в кубометре воздуха по трем ярусам центрального всаса ВЗТ ТЭЦ-2 при работающей ОУ ИТ 30.07.2020. Наибольшее количество аэрозолей зафиксировано на верхнем ярусе за ОУ ИТ, наименьшее — на нижнем ярусе. По сравнению с входным сечением количество аэрозолей за ОУ ИТ выросло в 2,8 раза на верхнем ярусе и в 2,4 раза на нижнем. Фильтры-коагуляторы класса G4 снизили количество аэрозолей на верхнем ярусе на 34,6% и на 10,5% на нижнем ярусе КВОУ. При этом на всех ярусах КВОУ количество аэрозолей за фильтрами-коагуляторами превышало количество частиц в атмосферном воздухе перед ОУ ИТ более чем в два раза.

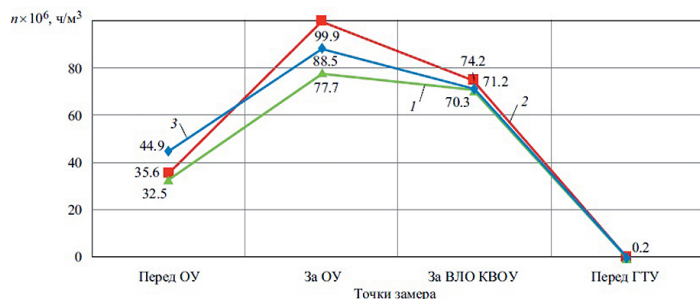


Рис. 3.13. Изменение общего количества частиц по трем ярусам центрального всаса ВЗТ при работающей ОУ ИТ 30.07.2020: 1 – нижний ярус; 2 – средний ярус; 3 – верхний ярус



а)



б)

Фото 3.14. Термограммы ОУ ИТ ТЭЦ-3 во время работы: а) перед ОУ ИТ; б) за каплеуловителем

Для повышения эффективности фильтров-коагуляторов КБОУ ГТУ по очистке влажного воздуха от аэрозолей за ОУ ИТ целесообразно использовать фильтр-элементы, изготовленные по новым технологиям. Широко известны и хорошо себя зарекомендовали как за рубежом, так и на отечественных ТЭЦ в ТГК-1 в Санкт-Петербурге и в ОГК-2 в Грозном фильтры, изготовленные по технологии Drop Safe, испытанные нами на водостойкость [6]. Для оценки равномерности смачивания циркуляционной водой поверхности матов из пористого материала TURBOdek (рис. 3.1), от которой зависит эффективность

ОУ ИТ в снижении температуры воздуха, на ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 они были тестированы с помощью тепловизоров.

На *фото 3.14* представлены термограммы во входном сечении пористого материала TURBOdek и за каплеуловителями влаги при работающей ОУ ИТ ТЭЦ-3.

Как видно на *фото 3.14а*, поле температур на поверхности пористого материала TURBOdek имеет незначительную неравномерность в диапазоне 2...3 °С. Это говорит о том, что не вся поверхность пористого материала матов ОУ ИТ орошается подаваемой водой одинаково. Термограмма температурного поля сепараторов (каплеуловителей) влаги с их торцевой стороны (*на фото 3.14б розовый цвет*) показывает практически нулевой градиент температуры по всей измеряемой площади.

Выводы:

– в ПАО «Мосэнерго» впервые разработана и внедрена система мониторинга работы ОУ ИТ, изменения температуры, относительной влажности и загрязненности воздуха по проточной частиц ВЗТ энергетических ГТУ при работающей ОУ ИТ, влияния влажности воздуха на перепад давления и срок службы фильтров КБОУ ГТУ;

– на основании опыта эксплуатации даны рекомендации по использованию ОУ ИТ во время повышенной влажности и в ночное время при разгрузках энергоблока, а также в зависимости от интенсивности и продолжительности атмосферных осадков в виде дождя;

– для ВЗТ энергетических ГТУ с ОУ ИТ целесообразно использовать на первой ступени очистки воздуха в КБОУ фильтры-коагуляторы, изготовленные по технологии Drop-Safe и хорошо зарекомендовавшие себя при работе в условиях повышенной влажности воздуха;

– защитные сетки фильтровального материала на ФТО при их реверсной установке по отношению к финишной ступени фильтрации КБОУ ГТУ должны быть размещены на чистой стороне воздуха;

– подачу циркуляционной воды по секциям ОУ ИТ, установленным на открытом воздухе, целесообразно распределять в зависимости от расположения КБОУ ГТУ относительно сторон света;

– существует острая необходимость включения в российский стандарт, определяющий требования к воздушным фильтрам для энергетических ГТУ, требования по определению их водостойкости.

Medica mente, non medicamentis
«Лечи умом, а не лекарством»
Латинское крылатое выражение

ГЛАВА 4

Влияние фактора воды на эксплуатацию ОУ ИТ энергетических ГТУ

Применение охладительных установок испарительного типа (ОУ ИТ) циклового воздуха энергетических ГТУ в летний период позволяет снизить ограничения выработки мощности, накладываемые высокими температурами наружного воздуха [1, 2, 3]. По этой причине в последние годы эти технологии нашли применение в отечественной электроэнергетике. Одна из первых ОУ ИТ в энергетике была установлена на Краснодарской ТЭЦ с энергоблоком ПГУ в Южном федеральном округе (ЮФО). На базе полученного опыта в течение последних лет в Центральном федеральном округе (ЦФО) на ряде ТЭЦ с энергоблоками ПГУ были внедрены ОУ ИТ циклового воздуха ГТУ.

Принцип работы ОУ ИТ заключается в подаче охлажденной воды из бака насосами под давлением в трубопроводы 1, где через отверстия вода последовательно поступает на водораспределительные кассеты 2 и кассеты испаряющего материала 3. Влага, которая не испарилась на кассетах и не стекла в дренажную систему, попадает в каплеотделители 4, где должна отделяться от воздушного потока (*фото 4.1*). Отверстия диаметром 3 мм расположены в верхней части труб орошения по дуге 60° (*рис. 4.2*) на расстоянии 50 мм друг от друга (*фото 4.3*).

Такое расположение отверстий обусловлено желанием производителя избежать чрезмерного износа кассет под воздействием струй воды. На *фото 4.1* синим цветом обозначены места попадания струй воды из отверстий в трубе на металлоконструкции ОУ ИТ, после чего вода стекает на водораспределительные кассеты. С поверхности кассет, орошаемых водой, влага испаряется, обеспечивая тем самым снижение температуры атмосферного воздуха, поступающего на всас ГТУ.

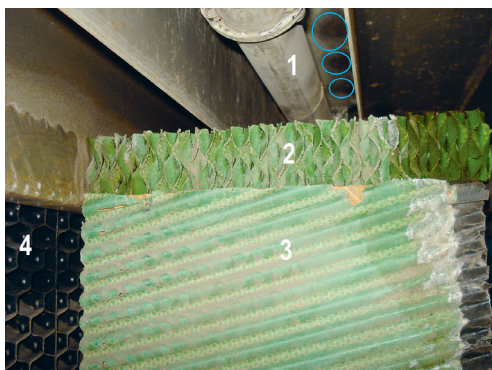
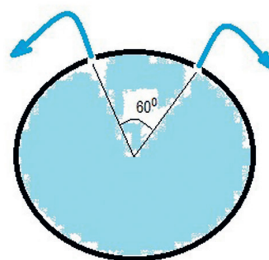


Фото 4.1. Элементы системы орошения ОУ ИТ:
1 – труба орошения; 2 – водораспределительная
кассета; 3 – испарительная кассета; 4 –
каплеуловитель



Диаметр отверстий 3 мм

Рис. 4.2. Расположение отверстий
на трубах орошения

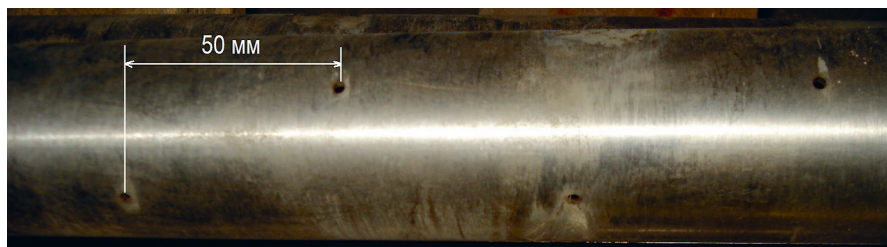


Фото 4.3. Расстояние между отверстиями на трубах орошения ОУ ИТ ГТУ

ОУ ИТ оснащены основным и резервным насосами подачи воды в трубопроводы орошения кассет. Для правильной циркуляции воды насос и бак хранения воды устанавливаются как часть рамной конструкции охладителя (фото 4.4). Приводные клапаны подачи воды с контролем уровня и клапан для слива воды с высокой проводимостью устанавливаются на раме насосного блока.

Автоматическая работа установки обеспечивается системой управления, которая запускает и отключает насос в зависимости от температуры и влажности окружающего воздуха, а также инициирует подачу сигналов тревоги, если система по какой-либо причине дает сбой. Она также отправляет информацию в систему управления БЦУ ПГУ об общем состоянии блока охладителей, температуре и влажности окружающей среды, средней температуре и влажности после охладителей и данные перепада давления в блоках охлаждения (рис. 4.5).

Стандартный щит управления обеспечивает следующую возможность: если температура окружающего воздуха опускается до уставки замерзания (+6 °C), клапаны открываются (перекрывается подача свежей воды) и вода сливается из

системы. При повышении температуры до $+10^{\circ}\text{C}$ и более инициируется подача воды в систему, и распределительный щит получает команду ON (дистанционный режим работы). При этом все значения могут быть скорректированы в соответствии с пределами, установленными для ГТУ.

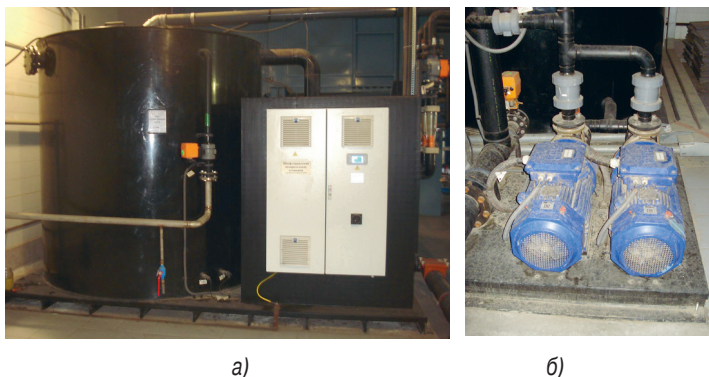


Фото 4.4. Система подачи воды в ОУ ИТ ГТУ: а) бак хранения воды с местный щитом управления; б) основной и резервный насосы подачи воды

Analog Input		1/14
Temp outside		20.3°C
Humidity outside		50.1%rH
Temp behind cooler		20.6°C
Humidity behind co...		49.9%rH
Temp 2 behind cool...		20.6°C
Humidity 2 behind ...		50.1%rH
Temp 3 behind cool...		20.7°C

Рис. 4.5. Показания местного щита управления перед пуском ОУ ИТ

Если все значения температуры соответствуют условиям функционирования охладителя, водяной насос запускается, и на охлаждающие кассеты подается достаточное количество воды. Важно следить, чтобы баки были максимально заполнены водой, так как для смачивания кассет при запуске оборудования требуется строго определенное ее количество. После смачивания кассет вода возвращается в бак. Если воды в баке недостаточно, о чем сигнализирует датчик уровня, насос временно отключается, предотвращая вероятность работы «всухую».

Насос включается при повышении уровня воды в баке по меньшей мере до минимальной рабочей отметки. Рабочий уровень воды зависит от этапа работы системы: при запуске он выше, чем в ходе дальнейшей эксплуатации.

В случае отключения или обесточивания системы охлаждения вода стекает в поддоны (лотки), что позволяет избежать переливов или минимизировать их (фото 4.6).



Фото 4.6. Сток воды с кассет в поддоны

Сетчатый фильтр встраивается в блок фильтров бака и защищает насос от попадания крупных частиц (фото 4.7).



Фото 4.7. Сетчатый фильтр в блоке фильтров бака (фото изнутри бака)

Все установленные ОУ ИТ конструктивно различаются как между собой, так и по сравнению с установкой в ЮФО. Одни ОУ ИТ ГТУ имеют трехсторонний всас воздуха, другие односторонний, вследствие чего меняется количество секций охлаждения воздуха. Из-за разных типов противообледенительных систем КВОУ ГТУ трубопроводы систем орошения на некоторых ОУ ИТ изготовлены из высокопрочной пластмассы, на других из нержавеющей стали. В отличие от ОУ ИТ, расположенных в ЦФО, установка в ЮФО не оснащена бачком с биоцидом для снижения количества органических примесей, содержащихся в воде (фото 4.8).



Фото 4.8. Бачок с биоцидом и насосом

Различие климатических условий и конструкций ОУ ИТ накладывает свои особенности на эксплуатацию этого оборудования. В ЮФО ОУ ИТ работает с апреля по октябрь включительно, а установки в средней полосе ЦФО только в течение пяти месяцев с мая по сентябрь. Кроме того, южная ТЭЦ не участвует в программе НПРЧ, поэтому ГТУ работает на номинальных режимах при полностью открытых ВНА осевого компрессора. Время работы энергоблоков ПГУ с ОУ ИТ в ЦФО аналогичной мощности в режиме НПРЧ в весенне-летний

период от 96 до 100%. В отличие от этого региона, где температура воздуха резко понижается, а влажность возрастает в ночное время (время снижения нагрузки оборудования), что вызывает необходимость остановки ОУ ИТ, на юге установка не отключается.

В результате коэффициент использования ОУ ИТ в южном регионе превышает 95%, а эффективность работы достигает максимальных значений. Установка отключается только в редкие периоды сильного дождя и тумана, когда относительная влажность воздуха становится выше 85%.

Существенное влияние на эффективность работы ОУ ИТ оказывает качество (химический состав) воды, подаваемой на орошение кассет установки, с которых испаряется влага. Согласно инструкций по эксплуатации ОУ ИТ ГТУ, к используемой воде предъявляются следующие требования: водородный показатель pH должен лежать в пределах 6,5–7,5, электропроводность не менее 50 мкСм/см, а содержание кальция (в виде CaCO_3) не более 150 ч/млн (ppm CaCO_3). Если качество воды слишком низкое (уровень электропроводимости превышает 150 мкСм/см), поддерживать баки с водой в заполненном состоянии при низкой относительной влажности (сухой воздух) и высоких температурах наружного воздуха может стать затруднительным. Содержание минеральных веществ в циркуляционной воде ОУ ИТ в большом количестве является причиной высокого расхода воды. *Отмечается, что система рассчитана на использование воды определенного качества.*

Величина pH воды — один из важнейших показателей качества для определения стабильности воды, ее накипеобразующих и коррозионных свойств, прогнозирования химических и биологических процессов, происходящих в природной воде. В зависимости от pH воду делят на семь групп (табл. 4.1). При низком pH вода обладает высокой коррозионной активностью, а при высоких уровнях ($\text{pH} > 11$) вода приобретает характерную мылкость, неприятный запах, вызывает раздражение глаз и кожи. Таким образом, согласно требованиям инструкции по эксплуатации, вода для ОУ ИТ ГТУ должна быть нейтральная.

Таблица 4.1

Классификация воды по степени кислотности (clck.ru/34NxCa)

Группа воды	Значение pH
Сильнокислая	До 3,0
Кислая	3,0–5,0
Слабокислая	5,0–6,5
Нейтральная	6,5–7,5
Слабощелочная	7,5–8,5
Щелочная	8,5–9,5
Сильнощелочная	Более 9,5

С 1 января 2014 года в России введен межгосударственный стандарт ГОСТ 31865–2012 «Вода. Единица жёсткости», согласно которому жесткостью воды называется совокупность свойств, обусловленных концентрацией в ней щёлочноземельных металлов, преимущественно ионов кальция (Ca^{2+}) и магния (Mg^{2+}). По этому ГОСТу жесткость выражается в градусах жесткости ($^{\circ}\text{Ж}$). 1 $^{\circ}\text{Ж}$ соответствует концентрации щелочноземельного элемента, численно равной 1/2 его миллимоля на литр (1 $^{\circ}\text{Ж}$ = 1 мг-экв/л). По величине общей жесткости различают воду *мягкую* (до 2 $^{\circ}\text{Ж}$), *средней жесткости* (2–10 $^{\circ}\text{Ж}$) и *жесткую* (более 10 $^{\circ}\text{Ж}$). Однако в зависимости от назначения ее применения (аквариумы), встречается более детальная градация жесткости воды (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Детальная классификация воды по жесткости (clck.ru/34NxtJ)

Очень мягкая	0–4 $^{\circ}$
Мягкая	5–8 $^{\circ}$
Средней жесткости	9–16 $^{\circ}$
Жесткая	17–32 $^{\circ}$
Очень жесткая	33 $^{\circ}$ и больше

Жесткость воды поверхностных источников существенно колеблется в течение года: она максимальна в конце зимы, минимальна в период паводка. Например, жесткость воды в Волге в марте достигает 4,3 $^{\circ}\text{Ж}$, в мае — 0,5 $^{\circ}\text{Ж}$ [4]. В подземных водах жесткость обычно выше (до 8–10, реже до 15–20 $^{\circ}\text{Ж}$) и меньше изменяется в течение года. Жесткая вода образует накипь на стенках нагревательных котлов и труб, чем существенно ухудшает их теплотехнические характеристики.

Солесодержание — условный показатель, характеризующий содержание в воде растворенных электролитов, выражается в миллиграммах хлорида натрия (NaCl) в литре воды эквивалентно измеренной величине электрической проводимости воды. В соответствии с гигиеническими требованиями к качеству питьевой воды суммарная минерализация не должна превышать 1000 мг/дм³. По согласованию с органами Роспотребнадзора для водопровода, подающего воду без соответствующей обработки (например, из артезианских скважин), допускается увеличение минерализации до 1500 мг/дм³.

Общая минерализация — количественный показатель растворенных в 1 л воды веществ (неорганических солей, органических веществ — кроме газов). Этот показатель также называют общим солесодержанием. Его характеристикой является сухой остаток, получаемый в результате выпаривания профильтрованной воды и высушивания задержанного остатка до постоянной массы (воду с сухим остатком до 1000 мг/л называют пресной).

Для предотвращения повышения содержания минеральных веществ в воде и образования твердого осадка на поверхности охлаждающих кассет в ОУ ИТ выполняется кондуктометрический анализ воды. Каждые 30 минут автоматически запускается насос биоцида, который работает в течение примерно 1 с. При выявлении повышенной проводимости воды сливной клапан открывается автоматически. Слив воды прекращается, когда проводимость воды снизится до необходимого уровня. Чем выше общая минерализация воды (количество растворенных солей) и ее жесткость, тем чаще сливается вода из бака охлаждающей воды ОУ ИТ, тем больше расход воды, а следовательно, и затраты на собственные нужды установки.

На ТЭЦ в ЮФО пришли к выводу, что для орошения блоков охлаждения ОУ ИТ целесообразно использовать артезианскую воду из собственных скважин, чем из р. Кубань. Хотя эта вода дороже кубанской, она гораздо чище (с небольшим количеством органических примесей) и постоянной температуры. В результате повышается эффективность испарения воды и снижаются затраты на очистку испарительных элементов.

В ЦФО в процессе анализа чувствительности инвестиционных проектов было принято решение по использованию для ОУ ИТ водопроводной воды, исходя из того что дисконтный срок окупаемости проектов уменьшится по сравнению с применением химически очищенной воды (ХОВ).

В табл. 4.3 представлены характеристики воды из водозаборов скважин артезианских колодцев на ТЭЦ в ЮФО.

Таблица 4.3

Характеристики воды из артезианских скважин на ТЭЦ в ЮФО [5]

Величина	Номер скважины					
	1	2	3	4	5	6
рН	8,07	7,24	8,00	8,00	8,13	7,55
Жесткость, °Ж	1,45	1,50	1,30	1,12	1,4	1,43
Общая минерализация, мг/дм ³	360,0	250,0	255,0	333,0	299,0	112,0

Как видно из представленных данных, по показателю рН удовлетворяет требованию инструкции по эксплуатации ОУ ИТ вода из скважин № 2 и № 6. Вода из всех скважин обладает достаточно небольшой жесткостью в диапазоне 1,12–1,5 °Ж и может классифицироваться как мягкая. Наибольшая минерализация (общее солесодержание) присуща воде из скважины № 1, а наименьшая — из колодца № 6. Сравнивая показатели воды из шести артезианской колодцев, приходим к выводу, что наиболее предпочтительной, с точки зрения соответствия требованиям инструкции по эксплуатации ОУ ИТ, является вода из источника № 6.

В табл. 4.4 представлены характеристики водопроводной воды, используемой для ОУ ИТ ГТУ на ТЭЦ, расположенных в ЦФО.

Характеристики водопроводной воды на ТЭЦ в ЦФО [5]

рН	7,4
Жесткость, °Ж	4,3
Общая минерализация, мг/дм ³	236,0



Фото 4.9. Отложения
на испарительных кассетах
ОУ ИТ в ЮФО

Несмотря на то что по водородному показателю рН водопроводная вода схожа с артезианской из источника № 6, ее жесткость более чем в три раза, а общая минерализация более чем в два раза превышает аналогичные показатели в ЮФО. Такая вода классифицируется по °Ж как вода средней жесткости.

Хотя показатели артезианской воды лучше аналогичных показателей водопроводной, на испарительных кассетах ОУ ИТ зафиксированы светлые отложения с рыхлой структурой (фото 4.9).

Аналогичные отложения имеют место и на кассетах ОУ ИТ ГТУ других ТЭЦ (фото 4.1), а также в оросительных и дренажных трубах (фото 4.10).

В конце сезона эксплуатации ОУ ИТ ГТУ на испарительных кассетах, орошаемых артезианской водой, наблюдаются биообрастания зеленого цвета в результате цветения воды. Интенсивность отложений на элементах оборудования ОУ ИТ в первую очередь зависит от таких качеств используемой воды, как жесткость и общая минерализация.

Образцы отложений в трубах орошения и дренажа ОУ ИТ были тщательно исследованы несколькими методами. Анализы отложений, выполненные

в химической лаборатории методом рентгено-флуоресцентной спектроскопии на приборе Epsilon 3, показали, что массовая доля отложений в трубе орошения на 52,74% (табл. 4.5), а в трубе дренажа на 51,48% (табл. 4.6) состоит из бинарного неорганического вещества окиси кальция CaO , что говорит о повышенной жесткости используемой воды.

Для определения элементного химического состава при исследовании образцов отложений был использован метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (Energy dispersive X-ray spectroscopy — EDX) на электронном сканирующем микроскопе (ЭСМ) компании Carl Zeiss [5]. Суть данного метода заключается в следующем: под воздействием (бомбардировкой) пучка электронов атомы исследуемого образца твердого вещества возбуждаются,

испуская характерное для каждого химического элемента излучение. При исследовании энергетического спектра такого излучения делается вывод о качественном и количественном составе образца.

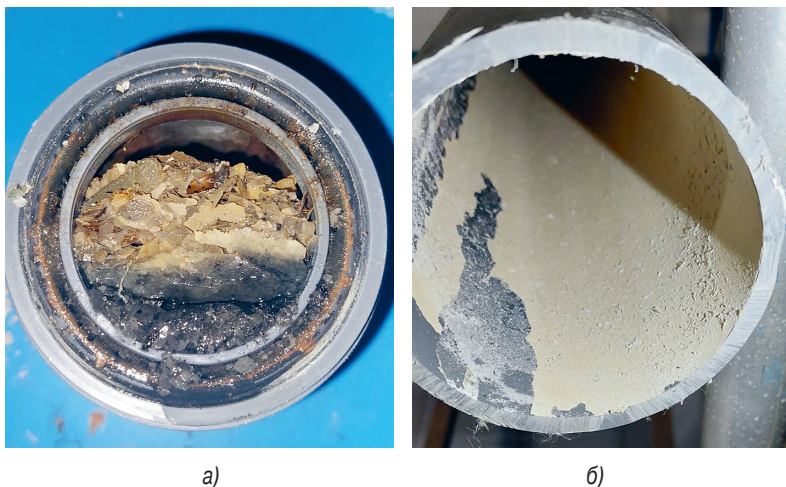


Фото 4.10. Отложения в водопроводах ОУ ИТ: а) отложения в трубах орошения; б) отложения в трубах дренажа

Таблица 4.5

Результаты анализов отложений в трубе орошения

Метод анализа	Компонент	Массовая доля, %
ГОСТ 26449.4–85 Рентгено-флуоресцентная спектрометрия	Потери/привес при прокаливании	42,55/–
	Оксид алюминия Al_2O_3	0,56
	Оксид кремния SiO_2	1,84
	Оксид серы SO_3	0,51
	Оксид кальция CaO	52,74
	Оксид магния MgO	0,38
	Оксид железа Fe_2O_3	1,37
	Оксид меди CuO	Следы
	Оксид цинка ZnO	Следы
	Оксид натрия Na_2O	–
	Хлориды Cl	Следы
Итого		99,95

Таблица 4.6

Результаты анализов отложений в трубе дренажа

Метод анализа	Компонент	Массовая доля, %
ГОСТ 26449.4–85 Рентгено-флуоресцентная спектрометрия	Потери/привес при прокаливании	46,62/–
	Оксид алюминия Al_2O_3	0,27
	Оксид кремния SiO_2	0,21
	Оксид серы SO_3	0,41
	Оксид кальция CaO	51,48
	Оксид магния MgO	0,17
	Оксид железа Fe_2O_3	0,22
	Оксид меди CuO	Следы
	Оксид цинка ZnO	Следы
	Оксид натрия Na_2O	–
	Хлориды Cl	0,60
Итого		99,98

Перед исследованием образец проходит специальную подготовку. Первоначально фрагменты отложений наносят на медный держатель (*фото 4.11*). Затем образцы помещаются в специальное устройство, где распылением на непроводящий или плохо проводящий материал образца ультратонким слоем наносят электропроводящее покрытие металл–золото/платина. Напыляющее покрытие позволяет увеличить количество вторичных электронов, что можно будет обнаружить на поверхности образца при исследовании на ЭСМ (*фото 4.12*).



Фото 4.11. Подготовка образца отложений для сканирования на ЭСМ

На *фото 4.13* показана структура образца отложений при различном увеличении на ЭСМ. На *фото 4.14а* (образец № 1 — отложения в трубе орошения) и *4.14б* (образец № 2 — отложения в трубе дренажа) представлен элементный химический состав на выделенной площади образцов. Зеленые области, показывающие процентное содержание Ca , наиболее многочисленны.

Области, окрашенные красным цветом, указывают на содержание углерода (C), а синим — кислорода (O) в этом анализе EDX.

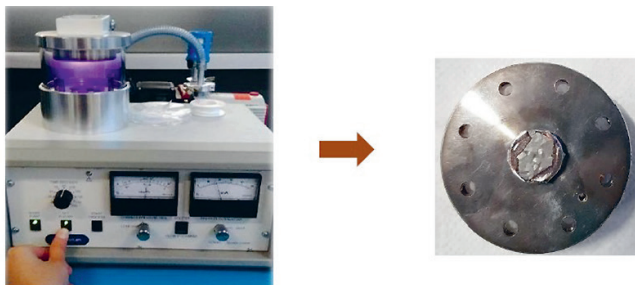


Фото 4.12. Сканирование образца отложений на ЭСМ

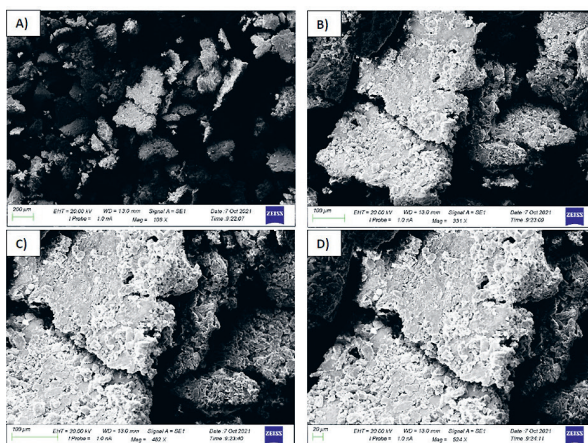


Фото 4.13. Структура образца отложений при различном увеличении на ЭСМ

Помимо обнаруженных химических элементов в образце две желтые области означают наличие молекул кремния (Si), характерных для частиц пыли и песка, содержащихся в атмосферном воздухе, поступающем на всас КВОУ ГТУ через кассеты орошения ОУ ИТ. Вода, омывающая кассеты орошения, смывает пыль и песок в дренаж, в результате чего эти загрязнения обнаружены только в отложениях в дренажных трубах.

Оба метода исследования, использованные для определения химического состава отложений в трубах ОУ ИТ, показали, что наибольшее количественное и качественное содержание в образцах составляет Са. Различия в результатах исследований по количественному составу Са обусловлены тем, что значения, полученные на сканирующем электронном микроскопе, представлены

в элементном составе, а по методу рентгено-флуоресцентной спектроскопии — в окислах. Кроме того, при прокаливании образцов были определенные потери массы отложений (табл. 4.5 и 4.6).

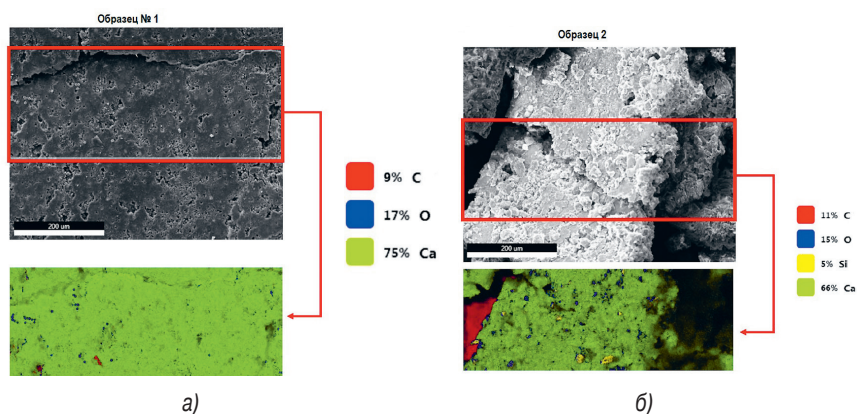


Фото 4.14. Элементный химический состав отложений в трубе: а) орошения, б) дренажа

В процессе подготовки инвестиционных проектов зачастую принимаются решения использовать для ОУ ИТ водопроводную воду. При этом не учитывается опыт эксплуатации других энергетических объектов, столкнувшихся с трудностями при использовании для ОУ ИТ ГТУ водопроводной воды с повышенной жесткостью и общей минерализацией.

Перспективными с точки зрения климатических условий регионами для использования ОУ ИТ на энергетических объектах нашей страны являются ЮФО и Приволжский федеральный округ (ПФО). Однако, как показал опыт эксплуатации ОУ ИТ энергетических ГТУ, существенное влияние на эффективность их работы оказывает качество используемой охлаждающей воды. В табл. 4.7 для сравнения представлены основные характеристики водопроводной воды в городах ЦФО, ЮФО и ПФО, опубликованные на официальных сайтах соответствующих водоканалов.

Таблица 4.7

Сравнение характеристик водопроводной воды в некоторых городах [5]

Химические показатели	Пределы значений	Города			
		Адлер	Казань	Краснодар*	Москва
Водородный показатель, pH	6–9	7,61	6,3	7,55	7,4
Жесткость, Ж	≤ 7	2,68	0,14	1,43	4,3
Общая минерализация, мг/дм ³	≤ 1000	139,0	23,0	112,0	236,0

*вода из артезианской скважины № 6

Очевидно, что все показатели водопроводной воды в Казани, расположенной на левом берегу Волги, лучше других соответствуют инструкции по эксплуатации ОУ ИТ ГТУ. Наиболее жесткая, содержащая высокий уровень общей минерализации (солесодержание) водопроводная вода в Москве.

Выводы:

- существенное влияние на отложения в трубопроводах и на кассетах ОУ ИТ оказывает жесткость применяемой воды: чем выше показатель °Ж, тем больше интенсивность отложений;
- использование биоцида в процессе водоподготовки охлаждающей воды не исключает возможности образования отложений на элементах ОУ ИТ;
- высокая минерализация воды, применяемой в ОУ ИТ, приводит к повышению ее электропроводности и, как следствие, к увеличению расхода.

Нет безнадежных больных.
Есть только безнадежные врачи
Ибн Сина

ГЛАВА 5

Опыт обслуживания и модернизации ОУ ИТ энергетических ГТУ

Опыт эксплуатации охладительных установок испарительного типа (ОУ ИТ) энергетических ГТУ показывает, что использование в качестве цикловой воды с повышенной жесткостью и высокой общей минерализацией приводит к образованию отложений на кассетах и в водопроводах установки [1]. В результате этого отверстия в трубах орошения дросселируются отложениями и не обеспечивают расчетного поступления воды на испарительные кассеты ОУ ИТ. Это явление можно обнаружить визуально, обратив внимание на сухие участки поверхности испарительных кассет при подаче воды в трубопроводы ОУ ИТ. Другим, более точным способом, позволяющим визуализировать и оценить площадь орошения кассет ОУ ИТ, является использование в процессе эксплуатации тепловизора. На *фото 5.1* для сравнения представлены термограммы поверхности испарительных кассет ОУ ИТ при дискретном (а) и наиболее полном орошении водой (б).

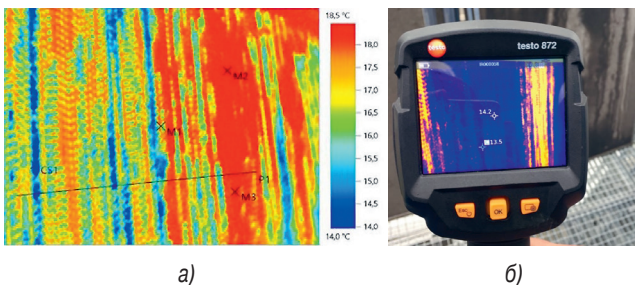


Фото 5.1. Термограммы поверхности испарительных кассет: а) дискретное орошение;
б) наиболее равномерное орошение

Синим цветом выделена площадь кассет (с пониженной температурой) орошаемых водой, красным — участки, куда вода не попадает. По интенсивности окраски орошаемого материала и приведенной ее градуировке в тепловизоре можно более точно, по сравнению с визуальным осмотром, оценить площадь орошения водой и уровень температурного поля испарительных кассет.

Постоянный мониторинг орошаемости кассет при помощи тепловизора является быстрым и надежным способом проверки эффективности функционирования ОУ ИТ во время подготовки к эксплуатации, а также в процессе работы ГТУ. Это позволяет своевременно обнаруживать неравномерную подачу воды на испарительные кассеты и принимать меры по ее устранению. Для улучшения орошаемости необходимо регулировать (увеличивать) подачу охлажденной цикловой воды по ярусам и сторонам ОУ ИТ энергетических ГТУ.

Другой, уже конструктивной причиной неравномерного орошения кассет охлаждающей водой является расположение отверстий в верхней части труб орошения (рис. 5.2).

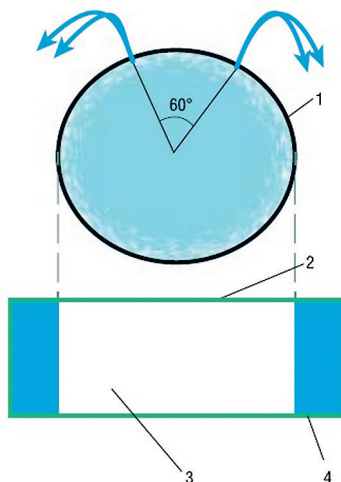


Рис. 5.2. Схема поступления цикловой воды из труб орошения на водораспределительные кассеты ОУ ИТ ГТУ: 1 — труба орошения; 2 — материал водораспределительной кассеты; 3 — площадь водораспределительной кассеты под трубой орошения; 4 — площадь водораспределительной кассеты, орошаемая водой

Поэтому подаваемая насосом ОУ ИТ охлаждающая вода разбрызгивается вверх, попадает на металлические конструкции, а затем сливается на водораспределительные кассеты. Название этих кассет говорит само за себя — равномерно распределять поступающую на них воду по поверхности испарительных кассет. При этом поверхность водораспределительных кассет, расположенная под трубой орошения, остается сухой (фото 5.3).

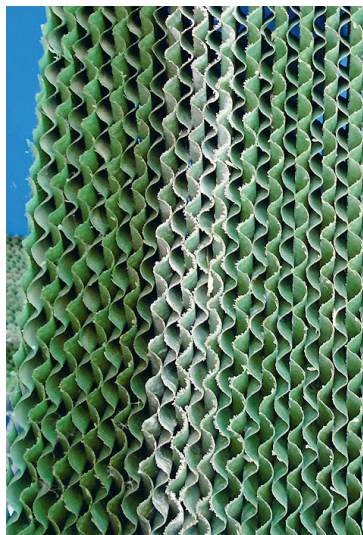


Фото 5.3. Сухая площадь под трубой орошения на водораспределительной кассете

В результате в процессе эксплуатации орошается водой не вся площадь испарительных кассет, появляются сухие участки на их поверхности и, как следствие, снижается эффективность работы ОУ ИТ (фото 5.4).

Согласно инструкции по эксплуатации, в процессе обслуживания ОУ ИТ ГТУ необходимо периодически осматривать отверстия труб орошения диаметром 3 мм и при необходимости очищать их тонким проволочным крючком диаметром 2,8 мм. Сделать это на работающей ОУ ИТ практически невозможно, поскольку доступ к оросительным кассетам перекрыт противомоскитными сетками и на них постоянно поступает охлажденная вода. Кроме того, из-за расположения отверстий на верхней части труб под углом 60° и небольшим расстоянием между трубами и металлоконструкциями ОУ ИТ тактильный доступ к ним ограничен, и поиск отверстий осуществляется вслепую — на ощупь (см.

фото 5.2). К тому же, как показывает практика обслуживания ОУ ИТ, при сильном загрязнении отверстий тонкая проволока гнется и не выполняет своего назначения.



Фото 5.4. Неравномерное орошение испарительных кассет ОУ ИТ

На ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» осмотр и очистка отверстий на трубах орошения ОУ ИТ проводится самодельными крючками с помощью телескопических поворотных зеркал с подсветкой (фото 5.5).

Причем на пластмассовых трубах орошения использование металлических (даже проволочных) крючков для прочистки отверстий нежелательно, поскольку через определенное время в результате воздействия металла на пластмассу отверстия могут быть деформированы, их диаметр превысит оптимальные, с точки зрения производителя, размеры. Расчетная подача охлаждающей воды на касеты орошаемого материала может быть нарушена. К со-



Фото 5.5. Осмотр отверстий на оросительном трубопроводе телескопическим зеркалом с подсветкой

жалению, телескопические поворотные зеркала с подсветкой для осмотра отверстий на трубах орошения, как и образцы крючков для их очистки, не входят в комплект поставки оборудования ОУ ИТ энергетических ГТУ.

Наиболее быстрым и эффективным способом осмотра труб орошения и дренажа изнутри является применение эндоскопов и видеоскопов. Видеоскоп — это одна из разновидностей эндоскопов, представляющая собой оптико-электронный прибор для проведения визуального осмотра внутренних полостей механизмов. На *фото 5.6*, полученных с помощью индустриального видеоскопа фирмы Olympus, показано дросселирование отверстия (а) и проходного сечения трубы орошения (б). Отверстия в трубах орошения ОУ ИТ в процессе использования воды повышенной жесткости и с высокой минерализацией постепенно заполняются нерастворимыми в воде солями кальция.

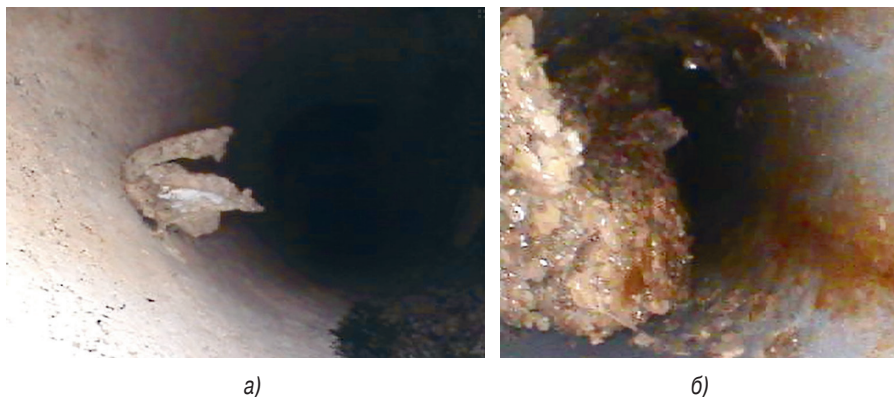


Фото 5.6. Дросселирование отложениями труб орошения ОУ ИТ: а) отверстия диаметром 3 мм; б) проходного сечения трубы

После завершения дросселирования отверстий у их основания за счет адгезии формируются сначала небольшие, а затем крупные отложения, препятствующие нормальному прохождению по трубам охлаждающей воды. С течением времени в трубах образуются заторы, сформированные большими массами отложений, которые препятствуют равномерному распределению охлаждающей воды по ярусам и всасам ОУ ИТ энергетических ГТУ.

Для осмотра трубы орошения должны иметь съемные торцевые заглушки, открывающие доступ внутрь водопроводов (*фото 5.7а*). Кроме того, в процессе эксплуатации целесообразно открывать эти заглушки для очистки водой труб от образовавшихся отложений. На *фото 5.7б* показано удаление отложений из труб орошения через открытые торцевые заглушки под давлением циркуляционной воды (проливка водой).

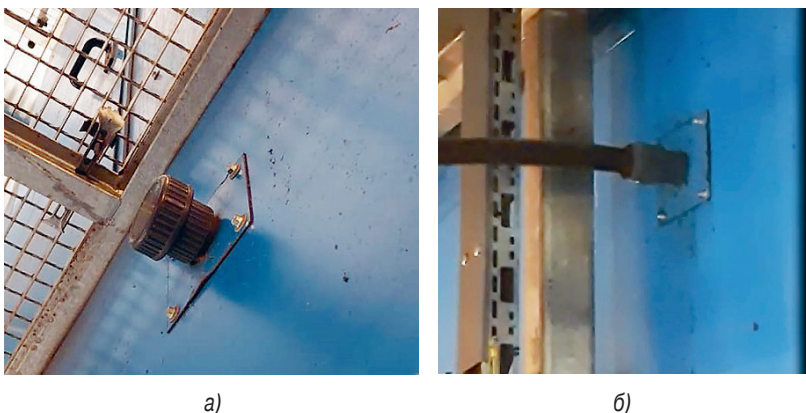


Фото 5.7. Торцевая заглушка на трубопроводе орошения: а) в закрытом состоянии; б) в открытом состоянии при проливке трубы

Эта процедура не предусмотрена инструкцией по эксплуатации ОУ ИТ энергетических ГТУ, но, как показала практика, достаточно эффективна для удаления крупных отложений в оросительных трубопроводах. К сожалению, производитель этих ОУ ИТ не всегда оснащает свое оборудование торцевыми заглушками, что усложняет его эксплуатацию и снижает эффективность использования. Для устранения этого конструктивного недостатка пользователи ОУ ИТ вынуждены самостоятельно устанавливать съемные торцевые заглушки на трубах орошения.

Для оценки эффективности очистки от отложений в трубах орошения ОУ ИТ путем проливки цикловой водой через торцевые заглушки, с помощью видеоскопа был осуществлен сравнительный анализ количества задресселированных отложениями отверстий в трубе до и после очистки. Документированный анализ показал, что более 95% отверстий были заблокированы загрязнениями в трубе до проливки водой и 80% после очистки.

Таким образом, проливка цикловой водой труб орошения ОУ ИТ позволяет разблокировать порядка 15% отверстий размером 3 мм. Частота проливок труб орошения ОУ ИТ напрямую зависит от качества (жесткости и общей минерализации) используемой воды. Загрязненность труб меняется по их длине: так, в районе торцевых заглушек отложения плотные, обладающее высокой адгезией к материалу труб.



Фото 5.8. Отложения в трубе дренажа ОУ ИТ

В трубах, изготовленных из нержавеющей стали, адгезия отложений выше, чем в трубах из прочной пластмассы. В трубах дренажа цикловой воды отложения становятся слоистыми, менее прочными, сцепление с внутренними поверхностями труб ослабевает (фото 5.8).

Для очистки отложений на элементах ОУ ИТ в инструкции по эксплуатации рекомендовано использовать лимонную кислоту. Однако ни процентного содержания лимонной кислоты, ни методики (процедуры) проведения такой очистки элементов ОУ ИТ не представлено.

На ТЭЦ, где используется вода из артезианских скважин, для периодической очистки элементов орошения от отложений в процессе эксплуатации ОУ ИТ применяется раствор перекиси водорода и лимонной кислоты (как известно, перекись водорода в бытовых и промышленных условиях используется как окислитель, отбеливающий агент и антисептик в виде разбавленного раствора). Дважды за сезон использования ОУ ИТ элементы кассет испарителей обрабатываются 0,1%-ным раствором лимонной кислоты. Таким образом, в расходный бак артезианской воды объемом 8 куб. м добавляют 10 кг лимонной кислоты и 30 литров 50%-ного раствора H_2O_2 .

В конце сезона эксплуатации ОУ ИТ на кассетах испарения наблюдаются биологические обрастания (зеленого цвета). В этом случае раствор лимонной кислоты заменяется на биоцид, а перекись водорода остается прежней — 0,1%-ный раствор. По опыту ТЭЦ высохшие элементы кассет испарителей после их снятия не поддаются очистке ни с помощью пылесоса, ни при промывке водой.

На некоторых ТЭЦ очистка труб орошения и дренажа ОУ ИТ ГТУ производится с помощью 5%-ного раствора ортофосфорной кислоты в совокупности с механической чисткой щеточными шомполами. ТЭЦ с ОУ ИТ, где трубы орошения изготовлены из нержавеющей стали, могут применять химическую

очистку циркуляцией нагретого фосфатного раствора. Результаты ранее выполненных исследований показали, что фосфаты могут быть применены для промывки котлов и другого теплообменного оборудования от карбонатной и сульфатной накипи [2]. На других ТЭЦ аналогичная процедура выполняется промывкой труб ОУ ИТ подогретой умягченной (Na-катионированной) водой для размягчения отложений с последующей очисткой щетками. На каждой ТЭЦ способ очистки выбирается исходя из степени загрязненности труб ОУ ИТ, материала, из которого изготовлены трубы, прочности адгезии отложений к материалу трубопроводов.

В ПАО «Мосэнерго» было принято решение о замене водопроводной воды в качестве цикловой на Na-катионированную воду. Этому решению предшествовала кропотливая работа по оценке влияния различного качества воды на оросительные и водораспределительные кассеты ОУ ИТ ГТУ. Минимальной жесткостью обладает вода, подвергшаяся химической обработке: умягченная (после Na-катионитного фильтра) и обессоленная. Важно отметить, что общая минерализация умягченной воды значительно выше, чем у обессоленной, и превышает этот показатель у водопроводной воды (табл. 5.1).

Таблица 5.1

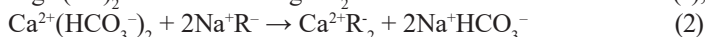
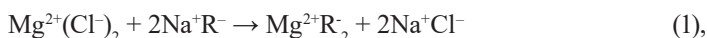
Основные показатели воды различного типа

	Жесткость общая, мгЭ/дм ³	Содержание кальция (в виде CaCO ₃), мгЭ/ дм ³	Содержание магния (в виде MgCO ₃), мгЭ/дм ³	pH	Общая минерализация, мг/дм ³
Умягченная	0,025	0,015	0,010	8,1	235
Обессоленная	0,005	0,0	0,0	8,6	4
Водопроводная	4,8	3,0	1,8	7,25	246,0

При этом водородный показатель pH химически обработанной воды выше значений, приведенных в инструкции по эксплуатации ОУ ИТ ГТУ. Значения pH умягченной воды даже на ТЭЦ, расположенных в одном городе, могут значительно отличаться друг от друга. Это отличие обусловлено качеством исходной воды для водоподготовки. Например, на одной ТЭЦ исходной является вода из артезианского колодца, а на другой — из циркуляционной системы котельного оборудования, имеющая более высокий pH.

При фильтровании через слой катионита происходит замещение присутствующих в воде катионов солей жесткости Ca²⁺ и Mg²⁺, способных к образованию накипи на поверхностях нагрева, на катионы Na⁺ фильтрующего материала, не образующие накипи.

Протекающие процессы ионного обмена описываются следующими уравнениями реакций:



Одним из недостатков Na-катионирования является высокое содержание фильтрата, поскольку ионный обмен характеризуется эквивалентностью, поэтому из воды удаляются ионы с меньшей эквивалентной массой (Ca^{2+} и Mg^{2+}), а их место занимает ион Na^+ с большей эквивалентной массой.

На ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» перед переходом с водопроводной на умягченную цикловою воду были проведены опыты по смешению Na-катионированной воды с водопроводной с целью снижения жесткости применяемой воды (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Исходные показатели катионированной и водопроводной воды

	pH	Общее содержание, мг/дм ³	Жесткость общая, °Ж
Na-катионированная	8,6	280	0,025
Водопроводная	7,25	218	4,7

Результаты смешения в различном процентном соотношении приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Результаты смешения Na-катионированной и водопроводной воды

Na-катионированная / водопроводная, %	pH	Общее содержание, мг/дм ³	Жесткость общая, °Ж
15/85	7,30	227	3,4
25/75	7,68	235	3,2
40/60	7,80	240	2,6
50/50	7,84	240	2,2

Как видно из представленных данных, жесткость смешанной воды начинает снижаться по мере увеличения процентного содержания Na-катионированной воды и достигает значения 2,2 °Ж при паритетном соотношении, что более чем в 2 раза ниже начального значения исходной водопроводной воды. При этом отмечается рост водородного показателя pH и общего содержания (общей минерализации) смешанной воды. Несмотря на то что в процессе лабораторных исследований удалось значительно снизить показатели жесткости водопроводной воды добавлением умягченной, уровень значения °Ж остается еще высоким, что соответствует воде средней жесткости. Жесткость Na-катионированной воды в 88 раз ниже жесткости смеси и в 188 раз — водопроводной воды.

Для оценки агрессивного влияния воды на материал водораспределительных и испарительных кассет ОУ ИТ в течение нескольких месяцев в лабораторных условиях проводились эквивалентные испытания образцов использованных в эксплуатации кассет погружением в водопроводную умягченную (Na-катионированную) и обессоленную воду (фото 5.9).



Фото 5.9. Образцы материала испарительных кассет, помещенные в различные виды воды

Для имитации условий эксплуатации образцы кассет ОУ ИТ ежедневно поливались свежей водой, таким образом уровень испаряемой воды за сутки дополнялся до исходного. По установленному графику через равный промежуток времени контролировались состояние образцов кассет ОУ ИТ и уровень отложений, выпавших в осадок. На *фото 5.10* показаны отложения, образовавшиеся на дне контрольной посуды для тестирования образцов в воде различного типа.

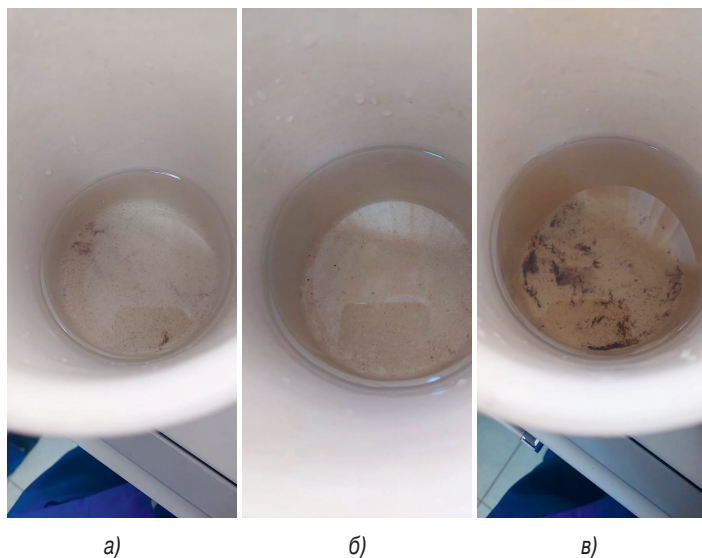


Фото 5.10. Отложения, образовавшиеся на дне мерной посуды в процессе тестирования образцов в воде: а) водопроводной; б) химически обессоленной; в) умягченной, Na-катионированной

Наибольшие отложения зафиксированы в посуде с образцом, тестированным в Na-катионированной (умягченной) воде. Это показывает, что грязевые отложения, образовавшиеся на кассетах ОУ ИТ в процессе эксплуатации, более эффективно очищаются именно такой водой. Агрессивного разрушения образца, находившегося несколько месяцев в этой воде, не было зафиксировано.

Для обеспечения подачи Na-катионированной воды на кассеты орошения на ТЭЦ были выполнены врезки умягченной воды в трубопроводы ОУ ИТ ГТУ (фото 5.11).

Не все трубы орошения на поставленных ОУ ИТ для энергетических ГТУ в ПАО «Мосэнерго» были оснащены съёмными торцевыми заглушками, позволяющими при обслуживании оборудования выполнить мониторинг внутреннего состояния труб орошения путем их проливки и с помощью видео или эндоскопов во время останова ГТУ. Кроме того, торцевые заглушки труб орошения были установлены внутри ОУ ИТ, поэтому даже при замене их на съёмные проливка трубопроводов могла сопровождаться загрязнением оросительных кассет (фото 5.12).

Для устранения этого конструктивного недостатка обслуживающий персонал самостоятельно выполнил комплекс мероприятий по обеспечению доступа в трубы орошения. Торцевые окончания труб были срезаны, в корпусах ОУ ИТ сделаны отверстия соответствующего диаметра. В созданные проемы были вставлены и зафиксированы соединительными муфтами дополнительные трубы, которые были выведены за пределы ОУ ИТ (фото 5.13).



Фото 5.11. Врезка подачи умягченной воды на ОУ ИТ

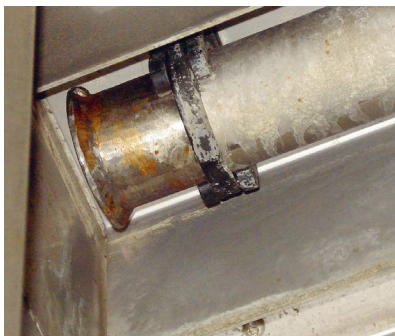


Фото 5.12. Торцевая заглушка на трубе орошения ОУ ИТ

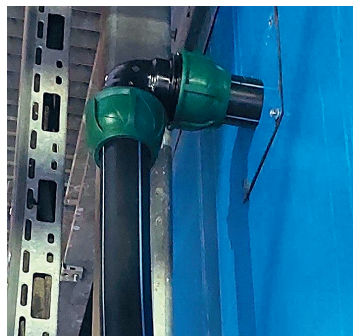


Фото 5.13. Труба проливки цикловой воды



Фото 5.14. Проливка труб орошения
ОУ ИТ цикловой водой



Фото 5.15. Отложения при
использовании умягченной воды

В результате появилась возможность оперативного мониторинга состояния труб и своевременной их проливки цикловой водой для удаления зарождающихся отложений (фото 5.14). Эта процедура не предусмотрена инструкцией по эксплуатации ОУ ИТ энергетических ГТУ, но, как показала практика, достаточно эффективна для удаления зарождающихся отложений в оросительных трубопроводах. Количество осадка, удаленного из труб орошения при работе ОУ ИТ ГТУ на умягченной воде, резко снизилось по сравнению с эксплуатацией на водопроводной цикловой воде.

Кроме того, изменился цвет и химический состав обнаруженных отложений. Если при работе на водопроводной воде цвет осадков был белый (см. фото 4.5) и основой этих отложений являлся CaO (52,74%), то при работе на умягченной (Na-катионированной) воде цвет осадков изменился на темно-коричневый (фото 5.15).

Результаты анализов отложений из оросительной трубы ОУ ИТ ГТУ, выполненных в химической лаборатории методом рентгено-флуоресцентной спектроскопии на приборе Epsilon 3, приведены в табл. 5.4.

Из представленных данных видно, что преобладающим в отложениях является диоксид кремния (оксид кремния) SiO_2 . Его бесцветные кристаллы практически нерастворимы в воде и обладают высокой твердостью и прочностью. При работе на водопроводной воде его величина в отложениях в этой же трубе составляла всего 1,84% (см. табл. 4.5). Вторым по значимости в отложениях стал оксид кальция CaO (25,59%), что в 2 раза меньше, чем при работе на водопроводной воде. Оба эти химические

Таблица 5.4

Результаты анализа отложений в оросительной трубе ОУ ИТ ГТУ

Метод анализа	Компонент	Массовая доля, %
СО 34.37.306–2001 Рентгено-флуоресцент- ная спектрометрия	Потери/привес при прокаливании	23,74/–
	Оксид алюминия Al_2O_3	6,13
	Оксид кремния SiO_2	31,24
	Оксид серы SO_3	0,79
	Оксид кальция CaO	25,59
	Оксид магния MgO	1,48
	Оксид железа Fe_2O_3	10,45
	Оксид меди CuO	Следы
	Оксид цинка ZnO	0,16
	Оксид натрия Na_2O	0,37
	Хлориды Cl	Следы
Итого		99,95

соединения (SiO_2 и CaO), а также обнаруженный оксид алюминия Al_2O_3 по своим внешним характеристикам не могут повлиять на изменение цвета отложений с белого на темно-коричневый. К изменению цвета привело наличие 10,45% оксида железа, что практически в 8 раз больше, чем в отложениях от водопроводной воды.

Выбор в пользу более дорогой умягченной в качестве цикловой воды ОУ ИТ, по сравнению с водопроводной, обусловлен не финансовыми, а техническими соображениями. Ежеминутная кажущаяся выгода при обосновании окупаемости финансовых проектов может обернуться впоследствии сложностями в эксплуатации оборудования, снижением эффективности его работы и ошибкой в прогнозе окупаемости проекта.

Полноценная очистка труб орошения от отложений после окончания периода эксплуатации ОУ ИТ трудновыполнима на штатных местах установки во время работы. Для улучшения визуального контроля внутреннего состояния труб орошения и качества их очистки водоводы были выполнены разъемными с помощью соединительных муфт и фасонных деталей по всей высоте КВОУ ГТУ (фото 5.16). В результате на ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» повысилась ремонтно-пригодность оборудования ОУ ИТ, расширились возможности использования различных вариантов и способов качественной очистки внутреннего состояния труб орошения при их снятии (фото 5.17).

Для проверки качества очистки трехмиллиметровых отверстий распыла цикловой воды целесообразно в затемненном помещении освещать внутреннюю поверхность труб орошения лампочкой низкого напряжения (фото 5.18).



Фото 5.16. Трубопроводы проливки системы орошения ОУ ИТ



Фото 5.17. Состояние труб орошения после очистки

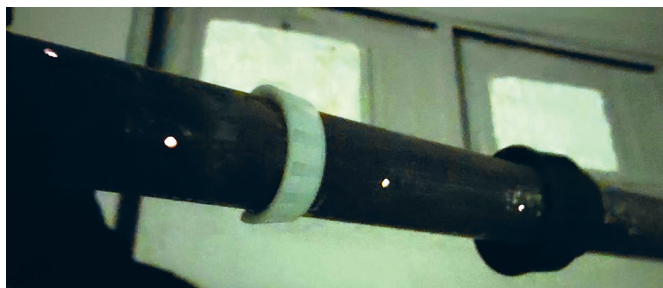


Фото 5.18. Проверка качества очистки отверстий в трубах орошения ОУ ИТ ГТУ

Как показал опыт эксплуатации энергетических ГТУ, заметное влияние на надежность и эффективность работы оборудования оказывает разность высот установки ОУ ИТ относительно бака и насосов охлажденной питательной воды. На ТЭЦ с ОУ ИТ ГТУ, где КВОУ с трехсторонним всасом расположены на крыше машинного зала, а бак с питательной водой установлен на уровне земли в машинном зале, создается достаточный водяной столб для обеспечения равномерного слива (дренажа) воды с поддонов, установленных под оросительными кассетами на разных сторонах и уровнях всаса атмосферного воздуха. Другая ситуация складывается на ТЭЦ, где ОУ ИТ располагается в том же помещении, что и бак с запасом питательной воды, возвышаясь над ним всего на 2 метра. В этом случае трубы дренажа, расположенные на удалении от бака (на другой стороне ОУ ИТ), «запираются» потоком воды, поступающим из труб, установленных рядом

с ним. В результате происходит переполнение поддонов, расположенных под оросительными кассетами, розлив воды и потери цикловой воды для орошения, приводящие к дополнительным затратам на собственные нужды ОУ ИТ. Кроме того, при повышенных, невосполнимых потерях питательной воды могут сработать датчики уровня в баке, что приведет к незапланированному останову ОУ ИТ ГТУ.

На схеме ОУ ИТ энергетической ГТУ с трехсторонним всасом КВОУ пунктиром изображена штатная труба орошения на первом ярусе со стороны установки бака с водой (рис. 5.19).

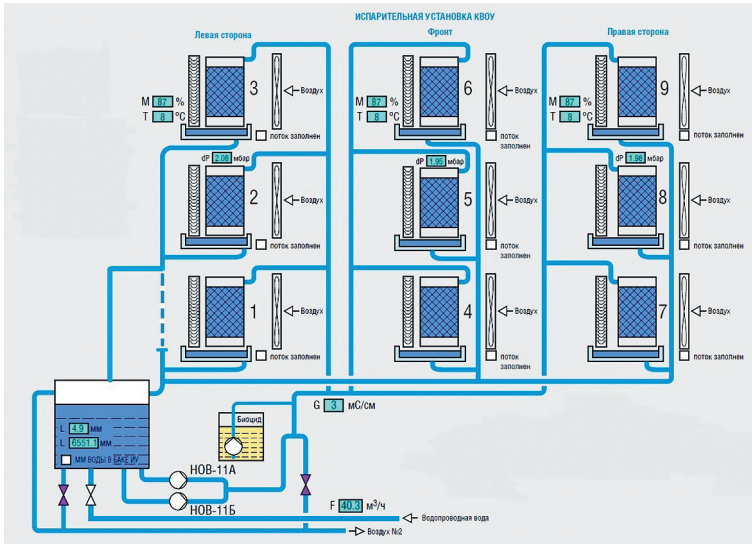


Рис. 5.19. Штатная и модернизированная схема дренажа ОУ ИТ ТЭЦ-20

В процессе модернизации ОУ ИТ эти дренажные линии были заглушены и смонтирована дополнительная труба индивидуального слива воды с левой секции второго и третьего ярусов (фото 5.20)

На ТЭЦ с ОУ ИТ ГТУ, расположенными на относительно большом расстоянии (высоте) от бака с цикловой водой, могут возникнуть проблемы с подачей достаточного количества воды на оросительные кассеты. В результате снизится глубина охлаждения атмосферного воздуха и эффективность работы ОУ ИТ ГТУ. При повышении температуры окружающей среды возможности увеличить подачу воды на оросительные кассеты для интенсификации процесса испарения может и не быть по причине ограниченной мощности насосов ОУ ИТ. Для предотвращения этого на этапе проектирования должен быть выполнен тщательный расчет мощности и напора насосов по месту расположения ОУ ИТ ГТУ и баков цикловой воды.



Рис. 5.20. Модернизированная линия дренажа ОУ ИТ

Также на этапе проектирования ОУ ИТ необходимо принять правильное решение при выборе материала труб орошения. Если противообледенительная система КВОУ ГТУ представляет собой распыл горячего воздуха через форсунки из-за одной из ступеней компрессора, то трубы орошения для предотвращения их повреждения должны быть металлическими (фото 5.21). Если в качестве противообледенителя КВОУ ГТУ применены теплообменные аппараты, то допускается использование пластмассовых труб орошения ОУ ИТ.

Другой причиной неоптимальной работы ОУ ИТ ГТУ могут служить конструктивные недостатки системы орошения. На фото 5.22а видно, что колено трубы коллектора системы орошения, проходящее в обе стороны над кассетами испарения, не имеет отверстий для распыла воды. В результате этого кассеты, установленные под коленом трубы, не орошаются водой, снижается эффективность испарения воды и охлаждения циклового воздуха ГТУ (фото 5.22б).



а)



б)

Фото 5.21. Трубы подачи воды в ОУ ИТ ГТУ: а) пластмассовая, повреждена горячим воздухом противообледенителя; б) металлическая

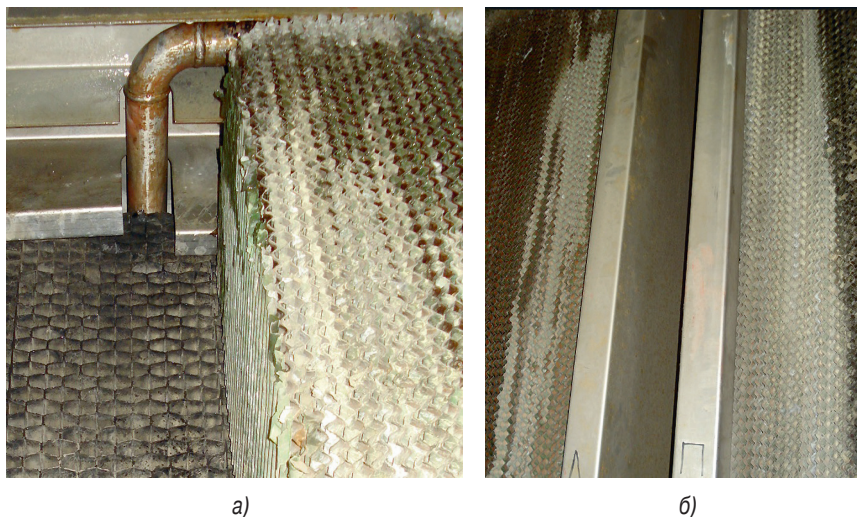


Фото 5.22. Конструктивный недостаток системы орошения ОУ ИТ: а) колено металлической трубы коллектора подачи воды без отверстий; б) несмоченные участки кассет испарения, установленных под коленами системы орошения

Выводы:

- при обосновании окупаемости проектов по ОУ ИТ энергетических ГТУ в процессе выбора цикловой воды для ее работы необходимо ориентироваться не только на финансовые показатели, но и на опыт эксплуатации других ТЭЦ с аналогичным типом воды;

- в результате использования водопроводной воды повышенной жесткости в ОУ ИТ происходит интенсивное дросселирование отверстий и проходного сечения труб орошения, приводящее к нарушению подачи охлаждающей воды на испарительные кассеты и снижению эффективности охлаждения циклового воздуха энергетических ГТУ;

- перед выбором того или иного типа воды для ОУ ИТ энергетических ГТУ целесообразно в химической лаборатории осуществить проверку агрессивности влияния выбранной цикловой воды на материал испарительных и водораспределительных кассет;

- очистка отверстий диаметром 3 мм труб орошения от загрязнений согласно инструкции по эксплуатации ОУ ИТ проволоочным крючком при тактильном способе обнаружения отверстий трудновыполнима. Для этой процедуры необходимо иметь телескопические поворотные зеркала с подсветкой;

- мониторинг орошаемости поверхности испарительных кассет тепловизором позволяет своевременно обнаружить недостатки в поступлении охлажденной воды на кассеты ОУ ИТ, визуальнo оценить их и принять меры по устранению;

– не на всех ОУ ИТ энергетических ГТУ трубы орошения оснащены съемными торцевыми заглушками. В результате обслуживающий персонал вынужден самостоятельно устранять этот конструктивный недостаток для обеспечения доступа внутрь труб орошения ОУ ИТ;

– мониторинг внутреннего состояния труб орошения и дренажа с помощью промышленного видеоскопа через съемные торцевые заглушки позволяет оценить масштаб загрязнения труб ОУ ИТ и выбрать соответствующий уровню отложений способ их очистки;

– совокупность организационно-технических мероприятий по использованию умягченной Na-катионированной воды с еженедельными проливками системы орошения ОУ ИТ на ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» позволила минимизировать дросселирование отложениями отверстий водоводов, что позитивно сказалось на орошении кассет и глубине охлаждения циклового воздуха энергетических ГТУ;

– модернизация систем ОУ ИТ в филиалах ПАО «Мосэнерго» позволила повысить их ремонтпригодность, выполнять качественную очистку труб орошения и предотвращать перерасход цикловой воды, связанный с переполнением поддонов системы дренажа.

Можно всю жизнь проклинать темноту,
а можно зажечь маленькую свечку.
Конфуций

ГЛАВА 6

Сравнительный анализ эксплуатации ОУ ИТ энергетических ГТУ в ПАО «Мосэнерго»

В ПАО «Мосэнерго» в 2019–2021 гг. на энергоблоках ПГУ ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 были введены в эксплуатацию охладительные установки испарительного типа атмосферного воздуха на всасе ГТУ Siemens SGT5–4000F и ГТЭ-160 АО «Силовые машины». Эти энергоблоки участвуют в программе договоров о предоставлении мощности (ДПМ). Первые результаты опытной эксплуатации оборудования и системы мониторинга циклового воздуха ГТУ по проточной части ОУ ИТ и комплексного воздухоочистительного устройства (КВОУ), разработанной в ПАО «Мосэнерго», представлены в [1–3].

В отличие от ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3, КВОУ ТЭЦ-1 имеет следующие особенности:

- односторонний, а не трехсторонний всас атмосферного воздуха;
- в противообледенительной системе (ПОС) предусмотрен распыл горячего воздуха через форсунки, а не теплообменные аппараты.

В результате этих отличий ОУ ИТ ТЭЦ-1 имеет шесть модулей (по два на правую и левую сторону каждого яруса), а не девять, как для КВОУ с трехсторонним всасом (*рис. 6.1*).

Кроме того, для предотвращения повреждений горячим воздухом через форсунки ПОС подводящие (отводящие) трубопроводы системы орошения и дренажа воды изготовлены не из пластмассы, а из нержавеющей стали.

Различаются эти две ОУ ИТ тем, что установка на ТЭЦ-3 находится в отдельном помещении здания энергоблока ПГУ, а на ТЭЦ-2 — на крыше машинного зала. Поэтому перед ОУ ИТ ТЭЦ-2 установлены погодные козырьки (как и на ТЭЦ-1), а на ТЭЦ-3 они отсутствуют (*см. фото 2.4*).

На КВОУ ТЭЦ-1 (*фото 6.2*), в отличие от системы очистки циклового воздуха ГТУ Siemens SGT5–4000F, установлена двух-, а не трехступенчатая

система фильтрации воздуха, состоящая из фильтров-коагуляторов класса М6 с карманами глубиной 500 мм и фильтров тонкой очистки группы ЕРА класса Е11 глубиной 400 мм.

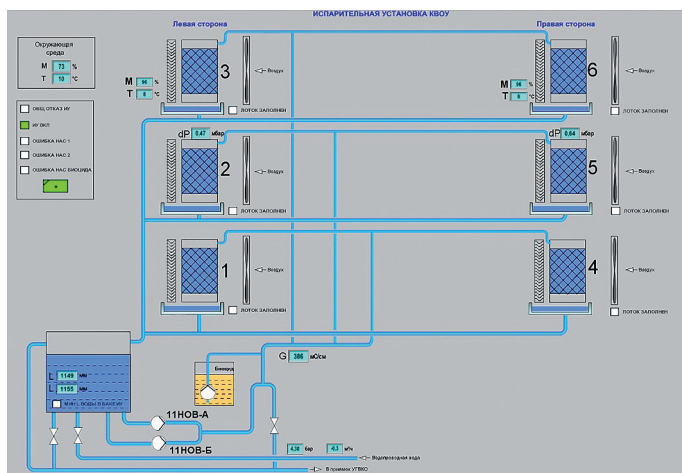


Рис. 6.1. Схема ОУ ИТ ГТУ ПАО «Мосэнерго» с односторонним всасом



Фото 6.2. КВОУ ГТУ ТЭЦ-1 с ОУ ИТ

Согласно данным многолетнего мониторинга загрязненности атмосферного воздуха на всасе воздухозаборных трактов (ВЗТ) ГТУ ПАО «Мосэнерго», из рассмотренных электростанций наибольшее количество частиц (и их концентрация) содержится на всасе КВОУ ТЭЦ-2 [4].

ТЭЦ-1 и ТЭЦ-3 расположены в центральной части Москвы, расстояние между ними по прямой всего 4 км, поэтому климатические факторы окружающей среды (влажность и температуру воздуха) для них можно считать одинаковыми. ОУ ИТ эксплуатируется по фактическим погодным условиям с мая по сентябрь, когда температура воздуха устанавливается выше $+12^{\circ}\text{C}$, а относительная влажность $RH \leq 80\%$. Общим для всех рассматриваемых ОУ ИТ ТЭЦ является то, что май и сентябрь в Москве — месяцы с неустойчивой погодой. Согласно архиву погоды, в Москве в мае 2020 г. средняя температура воздуха

в течение месяца колебалась от +4,6 до +16,5 °С, а средняя относительная влажность изменялась от 26 до 94%. Эта тенденция сохранилась и в 2021 г., когда температура воздуха в сентябре, согласно данным Гидрометцентра, соответствовала показателям октября с продолжительными осадками.

Как отмечалось ранее, июль в Москве — самый теплый и одновременно самый дождливый месяц. Однако в 2019 г. среднемесячная температура наружного воздуха в июле была всего +16,8 °С, что на 2,6 °С ниже средней температуры июля за всю историю наблюдений. Среднестатистическое количество дождливых дней в июле равно 12, но в этот год таких дней было 20, что существенно сказалось на продолжительности повышенной относительной влажности воздуха.

Как показал опыт эксплуатации, использование ОУ ИТ во время дождя средней и сильной интенсивности нецелесообразно, поскольку относительная влажность окружающей среды быстро достигает 85%, при которой применение установки ограничивается.

Все эти факторы безусловно отражаются на коэффициенте использования (КИ) ОУ ИТ (отношении часов работы ОУ ИТ к количеству астрономических часов в конкретном месяце). Наиболее информативным является КИ ОУ ИТ ТЭЦ-3, которая проработала три весенне-летних сезона с 2019 по 2021 г. (рис. 6.3).

В мае 2019 г. велась наладка оборудования ОУ ИТ, поэтому она начала работать в опытном режиме только с июня. Неблагоприятные климатические условия летнего периода этого года, отмеченные ранее, негативно отразились на сроках эксплуатации ОУ ИТ ТЭЦ-3. С 2020 г. ОУ ИТ эксплуатировалась в штатном режиме. Климатические условия, а также накопленный в первый год эксплуатации оборудования опыт позволили сотрудникам ТЭЦ-3 увеличить интенсивность эксплуатации ОУ ИТ ГТУ, в летние месяцы был достигнут КИ > 60%.

Жаркое лето 2021 г. дало возможность поднять коэффициент использования ОУ ИТ ТЭЦ-3 до самых высоких значений за три года эксплуатации оборудования (87%). На ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 в эти месяцы КИ ОУ ИТ достигал 65–76% (рис. 6.4).

Нужно иметь в виду, что КИ является интегральным показателем использования ОУ ИТ, который включает в себя не только климатические факторы окружающей среды, но и аварийные и плановые остановки энергоблока, ремонты его оборудования. На ТЭЦ-2 в июле 2021 г. началась главная инспекция ГТУ Siemens SGT5–4000F, которая из-за ограничений по пандемии Covid-19 превысила запланированное время. На ТЭЦ-1 в мае проводилась наладка оборудования ОУ ИТ, а в июне начался ремонт турбинного оборудования энергоблока ПГУ, поэтому в штатном режиме эксплуатация началась только в июле. Благодаря теплой погоде, в мае КИ ОУ ИТ всех ТЭЦ достиг самого высокого значения за три года эксплуатации этого оборудования и составил 46–62%.

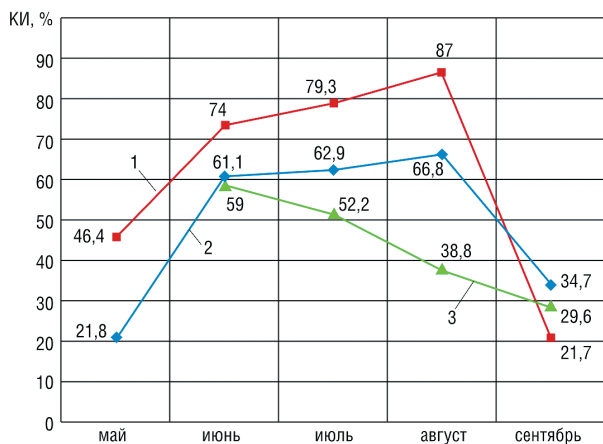


Рис. 6.3. Коэффициент использования ОУ ИТ ТЭЦ-3:
1 – 2021 г.; 2 – 2020 г.; 3 – 2019 г.

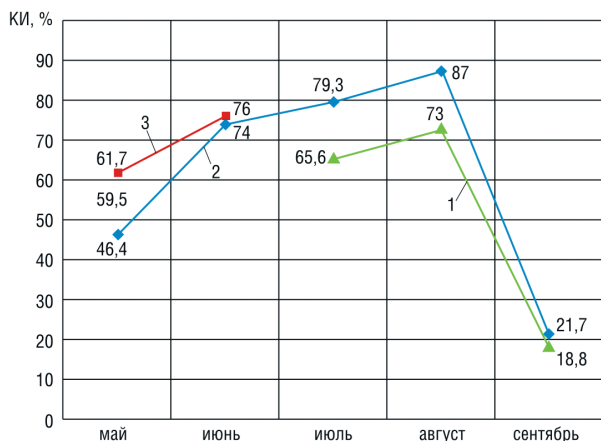


Рис. 6.4. Коэффициент использования ОУ ИТ в 2021 году:
1 – ТЭЦ-1; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-2

Другим интересным показателем является среднесуточное увеличение мощности энергоблока ΔN_{Σ} за счет работы ОУ ИТ. На рис. 6.5 показана зависимость ΔN_{Σ} для ТЭЦ-3 за 2020–2021 гг. Как видно из представленных графиков, в 2021 г. отмечается плавно восходящий тренд этого показателя в весенне-летний период эксплуатации и резкое падение в сентябре, обусловленное ухудшением погоды. В среднем за два года штатной эксплуатации ОУ ИТ ТЭЦ-3 в летний период ΔN_{Σ} составило 4 МВт.

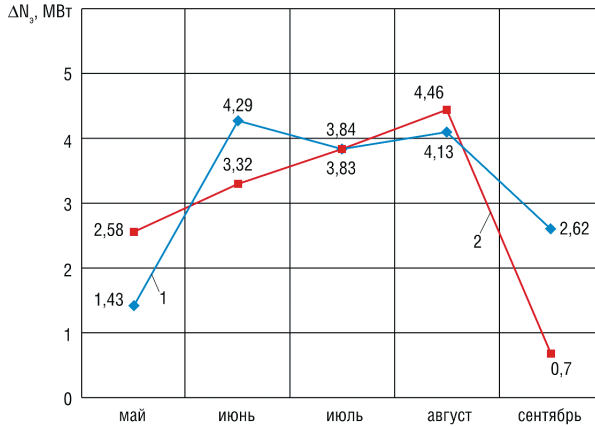


Рис. 6.5. Среднесуточный за месяц прирост мощности ТЭЦ-3 при использовании ОУ ИТ:
1 – 2020 г.; 2 – 2021 г.

Существенное влияние на дополнительную мощность оказывает временное ограничение работы энергоблока ТЭЦ в режиме НПРЧ, назначаемом Системным оператором, при котором сохраняется обязательный резерв мощности (например, 22,5 МВт для ТЭЦ-3). При отсутствии таких ограничений на ТЭЦ появилась возможность оптимально устанавливать угол открытия ВНА осевого компрессора ГТУ для получения дополнительной мощности. Все три энергоблока ПГУ с ОУ ИТ ГТУ ПАО «Мосэнерго» участвуют в программе НПРЧ (рис. 6.6).

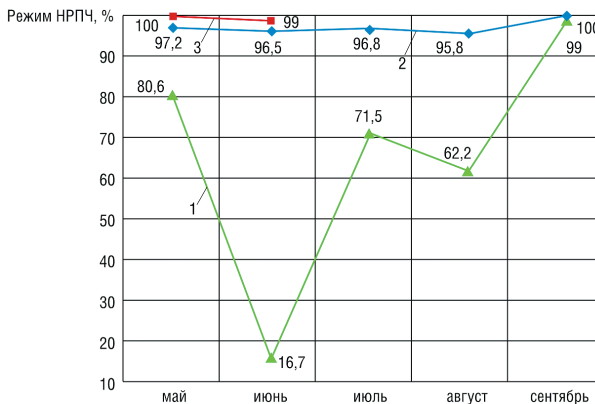


Рис. 6.6. Работа ТЭЦ с ОУ ИТ в режиме НПРЧ в 2021 году:
1 – ТЭЦ-1; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-2

Как видно из представленных данных, энергоблоки ПГУ с ГТУ Siemens SGT5–4000F ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 работали в режимах НПРЧ 96–100% всего времени. Низкое значение НПРЧ (16,7%) для ТЭЦ-1 в июне обусловлено ремонтом турбинного оборудования энергоблока ПГУ-220.

На рис. 6.7 показаны зависимости ΔN_{Σ} от периода эксплуатации ОУ ИТ ТЭЦ в 2021 г.

Тренды ΔN_{Σ} ТЭЦ-1 и ТЭЦ-3 идентичны по своей динамике и направлению. Наибольший прирост выработки электроэнергии в июне на ТЭЦ-2 по сравнению с ТЭЦ-3 (почти в 2 раза) обусловлен не только работой ОУ ИТ, но и техническими решениями, примененными на ГТУ Siemens SGT5–4000F.

На ГТУ ТЭЦ-2 был реализован так называемый алгоритм Turn Up, позволяющий переоткрывать лопатки ВНА (до 113%), что позволило увеличивать мощность ГТУ в режиме НПРЧ (ВНА = 80–85%) на 2,5–3 МВт, а в пиковом режиме на 8 МВт.

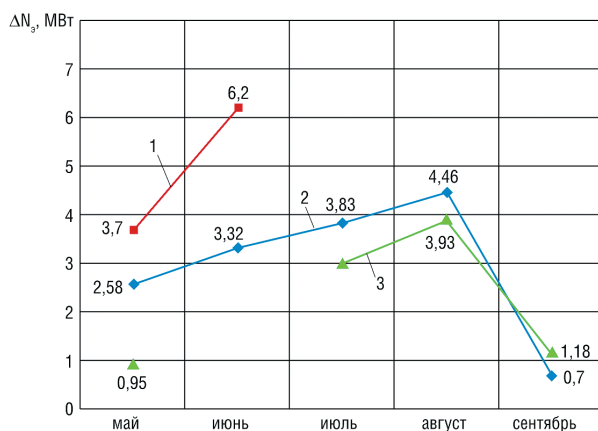


Рис. 6.7. Среднесуточный за месяц прирост мощности ТЭЦ при использовании ОУ ИТ в 2021 году: 1 – ТЭЦ-2; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-1

Проанализируем влияние ВНА осевого компрессора ГТУ на глубину охлаждения воздуха в ОУ ИТ и мощность ГТУ в режиме работы НПРЧ и без него.

Исходные данные:

- климатические условия (температура, влажность): $t = +24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $RH = 30\%$;
- расход воды на ОУ ИТ постоянный.

В табл. 6.1 показана взаимосвязь положения ВНА осевого компрессора ГТУ и глубины охлаждения воздуха в ОУ ИТ ТЭЦ-20 с увеличением мощности энергоблока ПГУ.

Таблица 6.1

Влияние ВНА на глубину охлаждения воздуха в ОУ ИТ и мощность ГТУ ТЭЦ-3

Положение ВНА, %	Глубина охлаждения, °С	ΔN_3 , МВт	Режим работы ГТУ
80	7,9	11,9	НПРЧ
85	7,8	12,0	НПРЧ
100	7,6	12,9	без НПРЧ

При значительном открытии ВНА расход воздуха через осевой компрессор повышается. В этом случае снижается влажность воздушного потока, поступающего в ОУ ИТ, поскольку расход воды в ОУ ИТ постоянен. В результате глубина охлаждения воздуха также снижается на всех режимах работы ГТУ, но незначительно. В режиме работы без НПРЧ по сравнению с режимом НПРЧ снижение глубины охлаждения атмосферного воздуха составляет всего 0,3 °С (7,9–7,6) при изменении угла поворота ВНА на 20% (100–80).

При увеличении угла открытия ВНА прирост мощности ГТУ на всех режимах работы увеличивается, несмотря на снижение глубины охлаждения воздуха в ОУ ИТ. Так, при увеличении открытия ВНА на 20% (100–80) и снижении глубины охлаждения воздуха на 0,3 °С прирост мощности ΔN_3 в режиме без НПРЧ по сравнению с режимом НПРЧ составляет 1 МВт (табл. 6.1).

Таким образом, фактор угла открытия ВНА оказывает преобладающее влияние на мощность ГТУ в режиме работы без НПРЧ по сравнению со снижением глубины охлаждения воздуха в ОУ ИТ. Подача дополнительного количества воды в ОУ ИТ в режиме без НПРЧ нецелесообразна ввиду незначительного влияния на выработку мощности.

Как видно из представленных графиков (рис. 6.7), несмотря на большую мощность энергоблока ПГУ ТЭЦ-3 в мае и июне 2021 г., среднесуточное увеличение мощности на ТЭЦ-2 выше. Можно *неэффективно использовать* ОУ ИТ при сильном дожде (высокой влажности воздуха), низкой температуре окружающей среды и т. д., чтобы получить высокий КИ. Этим параметром не в полной мере учитывается дополнительная мощность ΔN_3 ГТУ и ПГУ. В таких случаях коэффициент использования может быть большим, а дополнительная мощность ΔN_3 минимальной.

В целях усиления контроля за использованием ОУ ИТ ГТУ в ПАО «Мосэнерго» был введен коэффициент эффективности КЭ = ΔN_3 /КИ, который позволяет определить, как использовалась ОУ ИТ в течение суток, месяца, поскольку связывает оба эти параметра. На рис. 6.8 показан КЭ использования ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ-3 в весенне-летний период 2020–2021 гг.

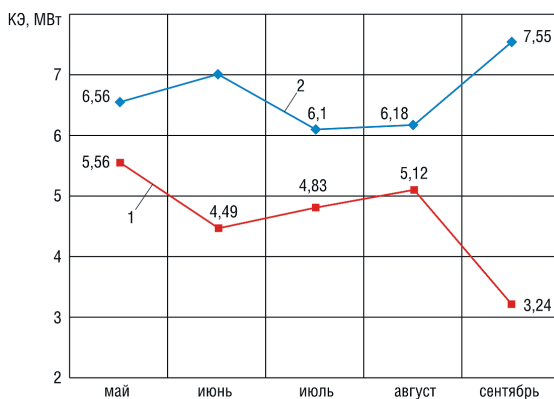


Рис. 6.8. Коэффициент эффективности ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ-3: 1 – 2021 г.; 2 – 2020 г.

Графические зависимости КЭ, полученные в 2020 и 2021 гг., имеют практически зеркальное отображение, показывающее, насколько эффективность использования ОУ ИТ в прошлом году была выше. Желание получить более высокие значения КИ ОУ ИТ (87%) в летний период 2021 г. отразилось на коэффициенте эффективности. На рис. 6.9 представлены графические зависимости КЭ ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 ПАО «Мосэнерго» при использовании ОУ ИТ в 2021 г.

За счет использования алгоритма Turn Up на ГТУ SGT5–4000F дополнительная мощность и КЭ на ТЭЦ-2 выше, чем на других ТЭЦ. Во время главной инспекции ГТУ SGT5–4000F на ТЭЦ-2 в 2021 г. алгоритм Turn Up был отключен, что позволило провести сравнительный анализ эффективности работы ОУ ИТ ТЭЦ при одинаковых условиях. Значения КЭ ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 в летние месяцы эксплуатации оборудования практически одинаковы при условии, что КИ ТЭЦ-2 в этот период на 14% выше, чем на ТЭЦ-1 (рис. 6.4).

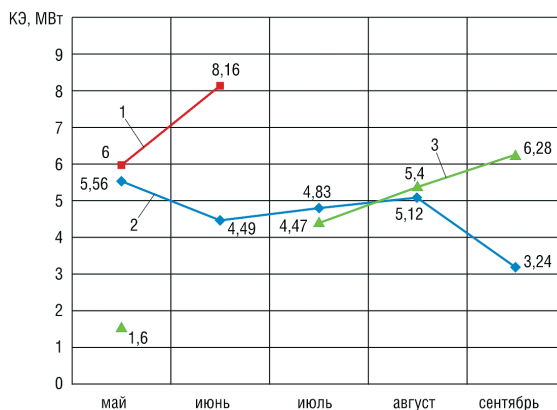


Рис. 6.9. Коэффициент эффективности ОУ ИТ ТЭЦ в 2021 году: 1 – ТЭЦ-2; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-1

Существенным для определения фактического суммарного эффекта от включения ОУ ИТ является учет затрат на собственные нужды. Поскольку мощность электронасосов подачи питательной воды в ОУ ИТ на ТЭЦ одинакова (18,3 кВт), определяющим в этой статье затрат является расход городской воды. На *рис. 6.10* представлены графики расхода городской воды Q_B для нужд ОУ ИТ на ТЭЦ-3 за 2020 и 2021 гг.

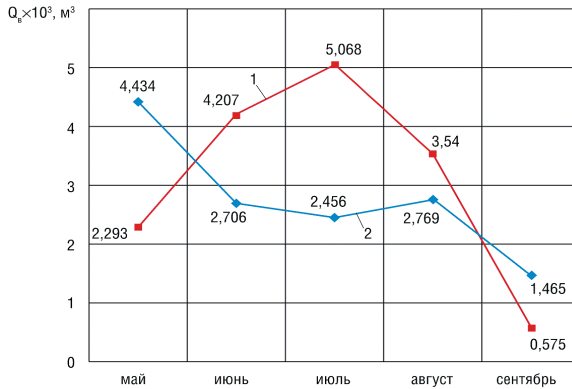


Рис. 6.10. Расход воды на ОУ ИТ ТЭЦ-3 в 2020 и 2021 годах: 1 – 2021 г.; 2 – 2020 г.

Расход воды на ОУ ИТ за сезон 2021 г. по сравнению с сезоном 2020 г. увеличился в 1,67 раза. Этому есть несколько причин, в первую очередь более высокие температуры воздуха в летний период 2021 г., что потребовало регулировать подачу воды в систему орошения кассет ОУ ИТ из-за повышенной испаряемости. Кроме того, эта процедура позволила улучшить орошаемость поверхности кассет, тем самым уменьшить количество сухих участков на них.

В *табл. 6.2* представлены данные по регулированию подачи воды на ОУ ИТ ТЭЦ-3 с момента начала ее эксплуатации в 2019 г.

Таблица 6.2

Регулировка подачи воды на ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ 3

Год	Сторона, т/ч			Всего, т/ч
	левая	центр	правая	
2019	28	16	19	63
2020	27	17	19	63
2021	29	17	20	66
Август 2021 г.	30	21	23	74

Такой расход воды по секциям влияет исключительно на эффективность работы кассет ОУ ИТ. Общий расход воды на установку определяется удельной

электрической проводимостью воды в баке (рис. 6.1) и не зависит от расхода воды, создаваемого насосом внутри цикла ОУ ИТ. Резкое снижение расхода воды на ОУ ИТ в августе 2021 г., несмотря на очень высокий КИ = 87% (рис. 6.4) и увеличение подачи воды по ярусам, обусловлено снижением среднесуточной температуры и увеличением среднесуточной влажности наружного воздуха. По этой причине уменьшилось количество испаряемой воды и, как следствие, в 1,6 раза снизилось количество промывок (сбросов воды) по сравнению с июлем для поддержания заданной электрической проводимости в баке с запасом цикловой воды. На рис. 6.11 показаны графики расхода воды ОУ ИТ в 2021 г.

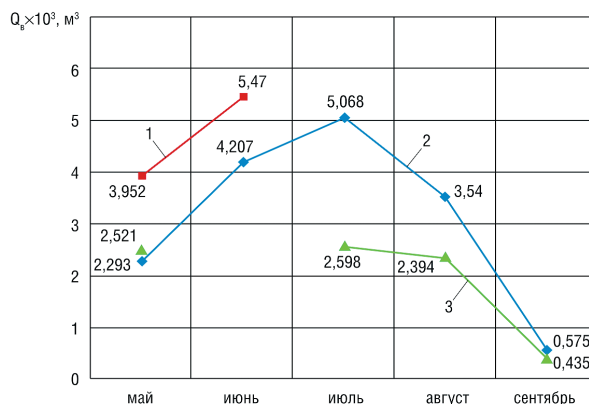


Рис. 6.11. Расход воды на ОУ ИТ ТЭЦ в 2021 году: 1 – ТЭЦ-2; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-1

Как видно из представленных графиков, расход питательной воды для ОУ ИТ на ТЭЦ-3 в июле выше в 1,95 раза, чем на ТЭЦ-1, а в августе — в 1,48 раза. Возвращаясь к рис. 6.4, понимаем, что и КИ ОУ ИТ ТЭЦ-3 в этот период времени в 1,2 раза выше, чем на ТЭЦ-1. Коэффициент использования ОУ ИТ на ТЭЦ-2 в мае выше на 15,3%, чем на ТЭЦ-3, а расход воды при этом больше в 1,72 раза. Практически при одинаковых значениях КИ в июне ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3, Q_v на ТЭЦ-2 все равно выше расхода воды на ТЭЦ-3 в 1,3 раза. Такое различие расходов питательной воды ОУ ИТ относительно коэффициента использования КИ на двух ТЭЦ можно объяснить разными настройками расхода воды на ОУ ИТ и уставками срабатывания датчика кондуктометрического анализа качества воды, влияющими на частоту дренирования бака. Даже при одинаковом качестве воды из одного источника для разных ТЭЦ состав питательной воды, поступающей в баки ОУ ИТ, может изменяться в зависимости от состояния подводящих трубопроводов. А на ТЭЦ-2 в качестве цикловой воды для ОУ ИТ, в отличие от других ТЭЦ, использовалась водопроводная вода.

Кроме того, на ТЭЦ-2 питательные насосы установлены в машинном зале на уровне земли. Гидравлический напор обеспечивает подачу расчетного расхода воды на ОУ ИТ. Однако из-за размещения ОУ ИТ на высоте 10,5 м над

уровнем земли насос работает на предельной нагрузке. Напротив, на ТЭЦ-3 насос размещен в помещении КВОУ ГТУ. Гидравлический напор достаточен для подачи дополнительного количества воды на ОУ ИТ. Однако система дренажа (диаметр трубы слива) спроектирована только на расчетный расход воды. Поэтому при увеличении подачи воды происходит водяной затор системы дренажа и вода начинает переполнять лотки стока воды ОУ ИТ по всасам КВОУ ГТУ. По этой причине на центральной секции всаса КВОУ количество подаваемой воды снижено (табл. 6.2).

На рис. 6.12–6.14 представлены результаты эксплуатации ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 в 2022 году.

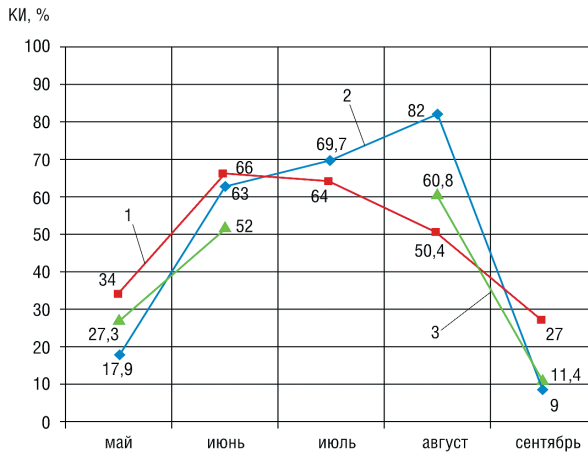


Рис. 6.12. Коэффициент использования (КИ) ОУ ИТ ГТУ в 2022 году:
1 – ТЭЦ-2, 2 – ТЭЦ 3; 3 – ТЭЦ-1

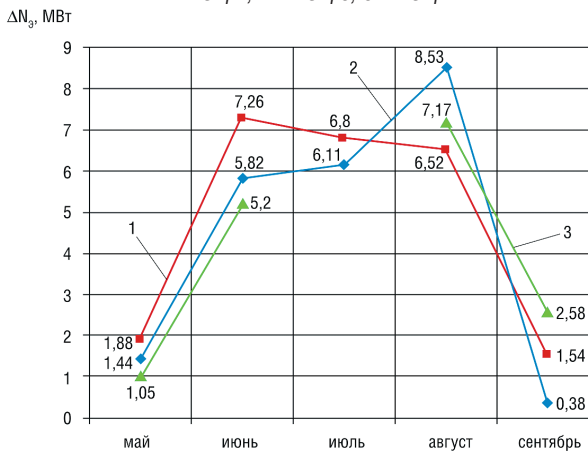


Рис. 6.13. Среднесуточный прирост мощности ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» при использовании ОУ ИТ в 2022 году: 1 – ТЭЦ-2; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-1

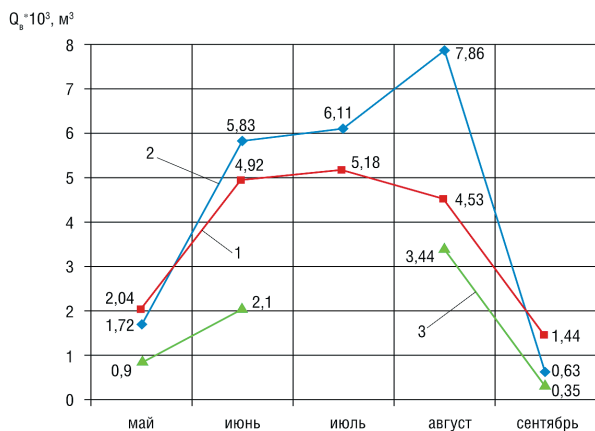


Рис. 6.14. Расход воды на ОУ ИТ ГТУ на ТЭЦ ПАО «Мосэнергосбыт» при использовании ОУ ИТ в 2022 году: 1 – ТЭЦ-2; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-1

Анализ работы ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 за весь период эксплуатации до 2025 года

Как уже отмечалось в начале эксплуатации ОУ ИТ на ТЭЦ-3 в 2019 году, июль в Москве — самый теплый и одновременно самый дождливый месяц. Такая тенденция продолжилась и в последующие годы. 21 июля 2025 года в Москве и Подмосковье выпало аномальное количество осадков — 82,3 мм. Госкорпорация «Роскосмос» в своем Telegram-канале сообщила, что 21 июля в Москве стало самым дождливым днем с 1879 года. В июле 2025 года в Москве было зафиксировано уже 23 дождливых дня, что значительно ограничило время работы ОУ ИТ ГТУ.

На круговых диаграммах *рис. 6.15* представлено процентное распределение наибольшего значения КИ по месяцам за 5 лет (2021–2025) совместной эксплуатации ОУ ИТ ГТУ на ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 при одинаковых климатических условиях.

На представленных диаграммах видно, что июль не является преобладающим по значению КИ для всех трех ТЭЦ и составляет 13,3% от общего времени использования всех ОУ ИТ. Такое же значение $K_{и}$ имеет и сентябрь месяц. Наибольший КИ принадлежит августу — 40%. Вторым по значимости КИ является июнь — 33,3%. А май не фигурирует ни на одной диаграмме.

Помимо климатических условий, влияющих на все ГТУ ТЭЦ в равной степени, существуют еще организационно-технические факторы, которые оказывают значительное влияние на показатели работы ОУ ИТ. К ним относятся выбор временных рамок проведения технических инспекций ГТУ (малая — раз в два года и главная — раз в шесть лет), плановые, внеплановые (аварийные) остановки и ремонты.

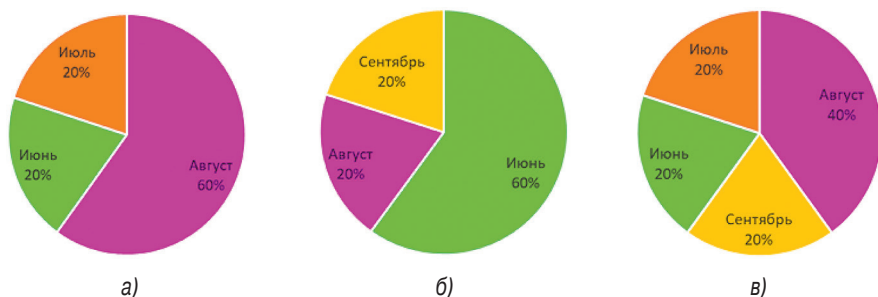


Рис. 6.15. Коэффициент использования ОУ ИТ за 5 лет: а) ТЭЦ-1; б) ТЭЦ-2; в) ТЭЦ-3

В зонах с умеренным климатом отопительный сезон может заканчиваться в конце апреля — начале мая, а следующий начинаться с середины сентября по начало октября (в зависимости от температуры наружного воздуха). В качестве примера приведены даты начала и окончания отопительного сезона в Московской области в 2025 году. Предыдущий отопительный сезон официально завершился 21 апреля, а 23 сентября начался новый.

Время для ремонта блоков ПГУ в таких климатических условиях строго ограничено. Кроме того, ремонт ГТУ в составе блоков ПГУ не может рассматриваться отдельно вне учета ремонта паросилового оборудования при подготовке к ОЗП (осенне-зимнему периоду) эксплуатации.

На рис. 6.16–6.18 представлены кривые изменения осредненных значений КИ, N_3 и Q_6 по месяцам за весь период эксплуатации ОУ ИТ ГТУ на ТЭЦ. Срок эксплуатации ТЭЦ-1 — пять сезонов (2021–2025), ТЭЦ-2 — шесть сезонов (2020–2025), ТЭЦ-3 — семь сезонов (2019–2025).

Проанализируем полученные зависимости. Параметры работы ОУ ИТ ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3, оснащенных одинаковыми ГТУ SGT5–4000F, имеют идентичную тенденцию с достижением экстремума значений в июне. Но эта тенденция для ТЭЦ-3 отличается от КИ на рис. 6.15б и в, значения которых были получены не за 7, а за 5 сезонов эксплуатации в одинаковых климатических условиях.

Показатели ОУ ИТ с ГТУ ГТЭ-160 ТЭЦ-1 отличаются от аналогичных зависимостей ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3, несмотря на то что все энергетические объекты находятся в одной климатической зоне, в Москве. Постараемся выяснить, в чем причина такого рассогласования параметров работы ОУ ИТ ГТУ на этих ТЭЦ.

В летний период наблюдается существенный спад потребления электроэнергии, обусловленный увеличением продолжительности светового дня и повышением температуры наружного воздуха. Анализ изменения осредненных за месяц максимумов электрической нагрузки в Москве показывает, что в течение летних месяцев нагрузка снижается на 20% по сравнению с зимним периодом [5]. Такой провал электрической нагрузки энергосистемы в летний период создает благоприятные условия для ремонта оборудования.

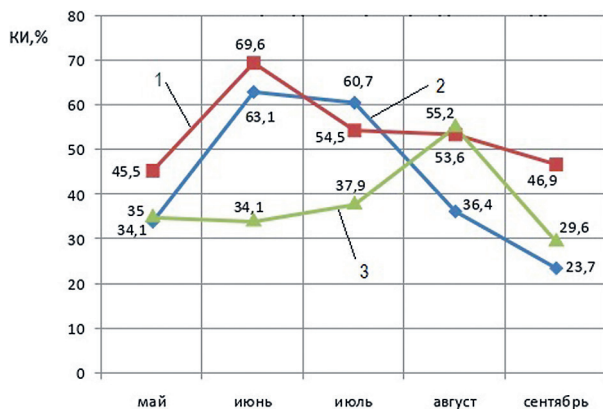


Рис. 6.16. Осредненный по месяцам коэффициент использования ОУ ИТ ГТУ за весь период эксплуатации: 1 – ТЭЦ-2; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-1

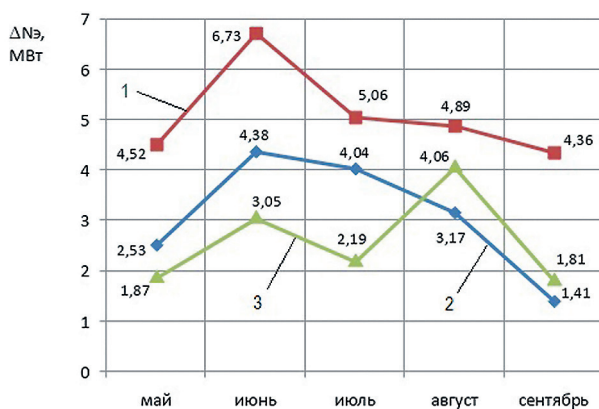


Рис. 6.17. Осредненный по месяцам среднесуточный прирост электрической мощности при использовании ОУ ИТ за весь период эксплуатации: 1 – ТЭЦ-2; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-1

Для некоторых стран, расположенных в климатической зоне с высокими летними температурами и развитой системой кондиционирования, наоборот, может быть характерен летний максимум электрической нагрузки.

Если техническое обслуживание ГТУ можно было проводить вне весенне-летнего периода эксплуатации ОУ ИТ, то, очевидно, показатели по выработке дополнительной мощности и электроэнергии выросли. Вместе с этим увеличилась и прибыль энергетической компании за счет дополнительно отпущенной потребителям электроэнергии. Однако из-за климатических условий в Московском регионе эта задача трудновыполнима.

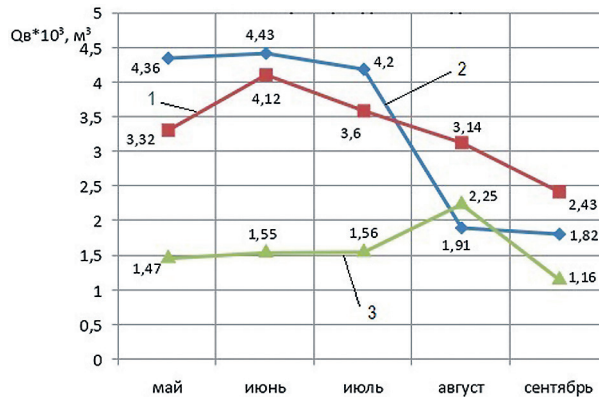


Рис. 6.18. Осредненный по месяцам расход воды на ОУ ИТ ГТУ за весь период эксплуатации: 1 – ТЭЦ-2; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-1

Если же технические инспекции или другие виды ремонтов выполняются в период благоприятных климатических условий теплого времени года (останов ОУ ИТ), то и технические, и экономические показатели будут значительно ниже, чем в предыдущем случае.

Рассмотрим, как организационно-технические факторы повлияли на показатели работы ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ в Москве.

Более резкий наклон (снижение) КИ, N_3 и Q_6 ОУ ИТ ТЭЦ-2, помимо климатических факторов, обусловлен тем, что инспекция ГТУ выполнялась в 2021 году именно в июле. Другие технические обслуживания за шесть лет эксплуатации проводились в августе и сентябре. Таким образом, наслоения (повторения) ремонтов в один и тот же месяц не было.

Параметры ОУ ИТ ТЭЦ-3 имеют более плавный, по сравнению с ТЭЦ-2, наклон рассматриваемых характеристик эксплуатации, поскольку инспекций и ремонтов ГТУ в этом месяце за все время эксплуатации не было. Зато другие четыре инспекции и ремонты выполнялись дважды в августе и столько же в сентябре. Этим и объясняется резкое снижение параметров работы ОУ ИТ в эти месяцы.

ТЭЦ-1 имеет плавные (слабо меняющиеся) характеристики работы ОУ ИТ, поскольку инспекции и ремонты ГТУ выполнялись в мае, июне и июле. Экстремум параметров отмечен в августе, в котором в течение пяти сезонов эксплуатации ОУ ИТ инспекций ГТУ не производилось.

Эксплуатация ОУ ИТ ГТУ на ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» осуществляется с мая по сентябрь включительно — 5 месяцев в году. Таким образом, за 7 лет весенне-летних сезонов оборудование блока ПГУ-420 ТЭЦ-3 находилась в различного вида ремонтах 11,8% этого времени, и ОУ ИТ не работала. На ТЭЦ-2 ОУ ИТ ГТУ не использовалась 10% в весенне-летний период

эксплуатации, а на ТЭЦ-1—12%. Суммарно из 10 ремонтов, которые на ТЭЦ проводились в весенне-летний период, только четыре были в мае и сентябре, что составляет 40%.

Согласно мониторингу окружающей среды, именно эти два месяца (май и сентябрь) относятся к периоду неустойчивой погоды в Московском регионе. Вероятно, было бы технически и экономически целесообразно проводить инспекции ГТУ и ремонты оборудования блоков ПГУ именно в мае и сентябре, а не в месяцы с более устойчивой погодой.

Такой подход к ремонтам ОУ ИТ ГТУ используется на Краснодарской ТЭЦ, где ОУ ИТ ГТУ включается в конце марта и отключается в конце октября. Май — начало июня — это период межсезонья, время малого спроса и самых низких цен на электроэнергию. Кроме того, это время паводка и срабатывания воды на ГЭС, что дает максимальную выработку электроэнергии. Именно в это время проводятся малая и главная инспекции ГТУ, которые занимают 35 и 60 суток.

Системный оператор (СО) Объединенной Энергетической системы (ОЭС) Юга планирует перенести ремонты блоков ПГУ на сентябрь—октябрь. Это обусловлено тем, что уже в середине июня погода бывает жаркой и повышается спрос на электроэнергию. Другими словами, в июле—августе СО вводится антипод ОЗП — ПЭВТ (период экстремально высоких температур). На это время устанавливается запрет всех плановых ремонтов для обеспечения максимальной загрузки генерации.

На основании анализа эксплуатации ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ можно определить основные факторы, оказавшие негативное влияние на эффективность работы ОУ ИТ в Москве:

- несоответствие погодных условий (температуры и влажности заборного воздуха) прогнозным данным;
- неустойчивые погодные условия в мае и сентябре;
- остановки блоков ПГУ для проведения ремонтов и технического обслуживания в месяцы с благоприятными климатическими условиями;
- конструктивные недостатки системы орошения испарительных кассет (ПЭД);
- значительная повреждаемость материала испарительных кассет в процессе установки/снятия и эксплуатации;
- загрязнение испарительных кассет пылью, песком и тополиным пухом;
- недостаточная прочность и эффективность каплеуловителей, приводящая к повреждениям и поступлению влаги на фильтры КВОУ ГТУ;
- более дорогая подпиточная вода качества ХОВ на ОУ ИТ ТЭЦ-3 и ТЭЦ-1 по сравнению с водопроводной водой на ТЭЦ-2.

Совокупность перечисленных факторов отражается на эффективности работы ОУ ИТ, определяет затраты на ее эксплуатацию и в конечном итоге влияет на срок окупаемости оборудования.

Ниже представлена методика оценки экономической эффективности работы ОУ ИТ. Брутто прибыль Π_6 от реализации дополнительно выработанной электроэнергии за счет ОУ ИТ, руб:

$$\Pi_6 = \sum \Delta N_j M,$$

где ΔN_j определяется на базе нормативно-технической документации (НТД) по топливоиспользованию энергоблока ПГУ как разность мощности с использованием ОУ ИТ и без нее при одинаковых климатических условиях, МВт;

$M = \Pi - C$ — маржа от продажи, руб/МВт;

C — себестоимость, руб/МВт;

Π — цена реализации, руб/МВт.

Затраты на собственные нужды ОУ ИТ (руб.) включают в себя затраты на работу электронасосов Z_n , затраты на расход воды Z_v , затраты на расходные материалы Z_{pm} :

$$Z_n = \tau N_n C;$$

$$Z_v = \tau Q_v \Pi_v,$$

где τ — время работы насоса ОУ ИТ, ч;

N_n — мощность насоса ОУ ИТ, МВт;

Q_v — расход воды, м³/ч;

Π_v — цена воды, руб/м³.

В случае использования химически очищенной воды в ОУ ИТ добавляются затраты на подготовку питательной воды $Z_{пв}$.

Чистая прибыль от реализации дополнительно выработанной электроэнергии за счет использования ОУ ИТ составляет:

$$\Pi_ч = \Pi_6 - Z_n - Z_v - Z_{пв} - Z_{pm}.$$

ГЛАВА 7

Анализ результатов эксплуатации кассет ОУ ИТ ГТУ

По окончании весенне-летнего периода эксплуатации ОУ ИТ ГТУ в 2022 г. была выполнена дефектация водораспределительных и оросительных кассет, а также каплеуловителей. На ТЭЦ-3 кассеты эксплуатировались четыре сезона, на ТЭЦ-2 — три, а на ТЭЦ-1— два сезона. Типичные повреждения этого оборудования ОУ ИТ зафиксированы на *фото 7.1* [1].

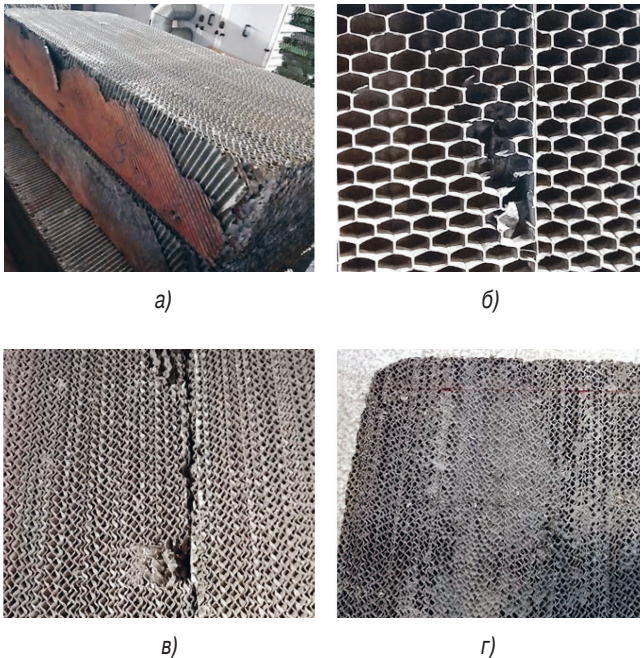


Фото 7.1. Типичные повреждения оборудования ОУ ИТ: а) оросительных кассет; б) каплеуловителей; в) щели при установке кассет в ОУ ИТ; г) загрязнение кассет

Кассеты признавались подлежащими замене при следующих дефектах:

- износ, замятия сопрягаемой поверхности кассет, приводящие к появлению зазора между ними;
- повреждение, замятие углов, граней кассет;
- расслоение материала водораспределительных кассет;
- занос фронтальной поверхности отложениями пыли.

В случае неплотного закрепления или повреждения противомоскитных сеток перед ОУ ИТ наблюдался занос материала кассет тополиным пухом и насекомыми в местах возникших протечек (фото 7.2).

Основная часть механических повреждений была получена при монтаже/демонтаже кассет на ОУ ИТ ГТУ из-за небольшой толщины и хрупкости материала, изготовленного из целлюлозы (фото 7.3).

Кроме того, надо помнить, что целлюлоза горюча, поэтому при ремонтных и сварочных работах в ОУ ИТ необходимо строго соблюдать правила пожарной безопасности (фото 7.4).

Результаты дефектации кассет и каплеуловителей ОУ ИТ приведены в табл. 7.1.

Опыт эксплуатации ОУ ИТ на Краснодарской ТЭЦ показал, что средний срок службы водораспределительных кассет составляет 2–3 года, испарительных кассет — 4–5 лет.

На фронтальных поверхностях кассет TURBOdek на ОУ ИТ ТЭЦ-2,



Фото 7.2. Занос кассет ОУ ИТ ГТУ тополиным пухом и двукрылыми насекомыми



Фото 7.3. Толщина материала кассет ОУ ИТ компании Munters



Фото 7.4. Горение материала кассет из целлюлозы

ТЭЦ-3 наблюдается значительное количество отложений, состоящих из песка, органических соединений воды, насекомых, плодов цветения растений (фото 7.1г). Глубина проникновения этих отложений внутрь кассет по ходу потока воздуха варьируется от 50 до 200 мм и более в зависимости от срока эксплуатации (фото 7.5а). Вблизи каплеуловителей пылевые отложения практически отсутствуют. Отложения песка и органических соединений, содержащихся в воде, отмечаются и на всей поверхности каплеуловителей (фото 7.5б) [2].

Таблица 7.1

Результаты дефектации кассет и каплеуловителей ТЭЦ с ОУ ИТ ГТУ (%)

ТЭЦ	Срок эксплуатации	Водораспределительные кассеты CELdek 600×300×50	Кассеты TURBODEK 1500×600×300	Кассеты TURBODEK 1360×600×300	Каплеуловители TURBODEK 1500×700×125 1500×600×125
1	2	11,1	27,3	25,5	11,4
2	3	48,1	45,4	48,1	18,7
3	4	63,2	64,9	67,5	9,6



а)

б)

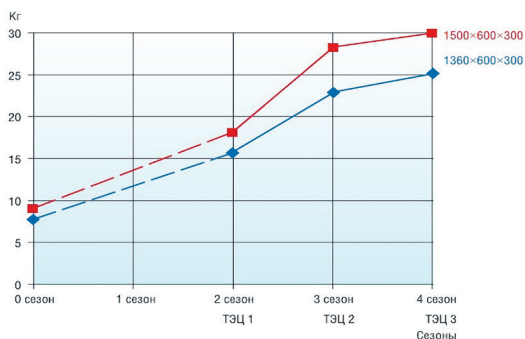
Фото 7.5. Глубина проникновения загрязнений внутрь:
а) кассет; б) каплеуловителей

Для оценки изменения массы кассет в зависимости от срока эксплуатации были взвешены новые кассеты и кассеты после использования на

ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3. Процедура взвешивания и результаты представлены на рис. 7.6.



а)



б)

Рис. 7.6. Результаты изменения массы кассет: а) 1500×600×300 мм на ТЭЦ-3; б) на ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 на время эксплуатации

Масса новых кассет TURBOdek размером 1500×600×300 мм составила 8,9 кг, а кассет 1360×600×300 мм — 7,8 кг. Из представленных графиков видно, что масса кассет TURBOdek на ТЭЦ-3 за четыре сезона эксплуатации увеличилась более чем в 3 раза, на ТЭЦ-2 за три сезона в 3 раза, а на ТЭЦ-1 за два сезона в 2 раза. Целесообразно напомнить, что ОУ ИТ и КВОУ ГТУ на ТЭЦ-3 расположены в помещении, а ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 — на открытой площадке. Этим обусловлены темпы загрязнения кассет на ОУ ИТ ГТУ. Представленные результаты замеров массы опровергли заявления отдельных специалистов, что ОУ ИТ является дополнительным фильтром воздуха и при этом очищает кассеты от загрязнений орошаемой водой. Безусловно, кассеты задерживают определенное количество пыли, поступающей вместе с атмосферным воздухом, но сами при этом полностью не очищаются. Более того, со временем их поры забиваются пылью, отложениями воды, двукрылыми насекомыми и плодами цветения растений, при этом они сами становятся источником загрязнений циклового воздуха ГТУ и роста перепада давления на всасе ВЗТ турбомашин.

Для оценки роста перепада давления на кассетах TURBOdek из-за возникших загрязнений в результате эксплуатации были протестированы образцы кассет размером 600×600×300 мм с ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, ТЭЦ-3 на аэродинамическом стенде ООО «Фильтрационные технологии» [3]. С этой целью первоначально был протестирован образец новой кассеты TURBOdek, а затем образцы использованных кассет с ТЭЦ.

На фото 7.7 представлен процесс тестирования образца кассет с ТЭЦ-3 на аэродинамическом стенде, а на рис. 7.8 — результаты испытаний образцов с ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, ТЭЦ-3.



Фото 7.7. Тестирование образца кассеты TURBOdek с ТЭЦ-3

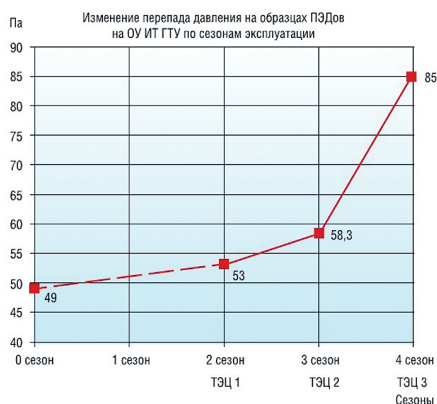


Рис. 7.8. Зависимость перепада давления на кассетах от срока эксплуатации на ТЭЦ

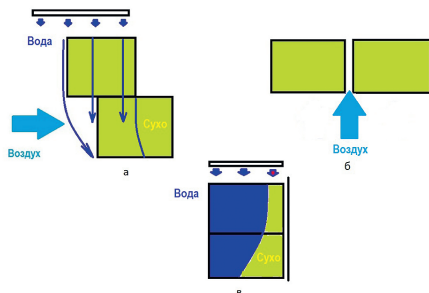


Рис. 7.9. Ситуации, возникающие при эксплуатации кассет в ОУ ИТ: а) смещение; б) щели; в) дросселирование грязью отверстий подачи воды в трубах

Как видно из представленного графика, перепад давления на кассетах ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ-3 за четыре сезона эксплуатации увеличился на 73,5%, на ТЭЦ-2 за три сезона использования всего на 18,4% — хотя ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ-3 находится в закрытом помещении, а не на открытой площадке. Это говорит о том, что на рост перепада давления оказывает влияние не только загрязненный воздух, но и механическое состояние кассет. Оприскивательные кассеты TURBOdek, отработавшие четыре сезона на ТЭЦ-3, более повреждены, чем на других ТЭЦ. В результате этих повреждений (фото 7.1) при установке ранее использованных кассет в ОУ ИТ возникают ситуации, представленные на рис. 7.9.

При смещении нижних кассет относительно верхних влага не орошает всю поверхность нижестоящих, а стекает вниз (рис. 7.9а). При образовании щелей между кассетами грязный и теплый воздух, не охладившись, поступает на фильтры КВОУ ГТУ (рис. 7.9б). По причине засорения отверстий в водоводе кассеты неравномерно орошаются цикловой водой (рис. 7.9в). Из-за повреждения кассет уменьшаются их габаритные размеры, что приводит к выпадению кассет из ОУ ИТ в процессе эксплуатации.

На фото 7.10 зафиксированы характерные ситуации при эксплуатации кассет в ОУ ИТ ГТУ (см. рис. 7.9а, б). Вода стекает мимо кассет нижнего яруса, а горячий воздух поступает в щель между кассетами.

Недостаточной прочностью (см. *фото 7.1*) и эффективностью сепарации влаги обладают каплеуловители шведского производителя ОУ ИТ. На *фото 7.11а* отчетливо видно проникновение цикловой воды ОУ ИТ через каплеуловитель. В результате влага поступает в КБОУ на систему фильтрации циклового воздуха ГТУ (*фото 7.11б*). Фильтровальный материал фильтров элементов намокает, что ведет к росту перепада давления и снижению эффективности очистки воздуха (см. *рис. 3.3*). Следствием роста перепада давления на воздушных фильтрах и снижения их эффективности является более интенсивное загрязнение лопаток осевого компрессора (несмотря на использование в КБОУ финишных фильтров класса E10-E11 согласно ГОСТ Р 71176–2023), прогрессирующая деградация характеристик ГТУ и снижение выработки электроэнергии.

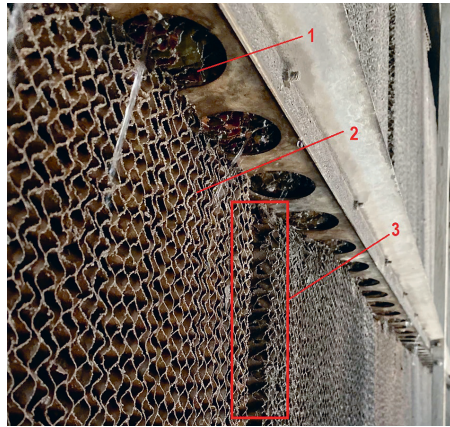


Фото 7.10. Характерные ситуации с кассетами ОУ ИТ ГТУ: 1, 2 — смещение кассет нижнего яруса относительно кассет верхнего яруса; 3 — щель между кассетами



а)



б)

Фото 7.11. Неэффективная сепарация влаги каплеуловителем: а) протечки воды через каплеуловитель; б) следы влаги на корпусе фильтра тонкой очистки класса F8, установленного реверсно к финишному фильтру класса E10

Все перечисленные ситуации снижают эффективность ОУ ИТ, прирост мощности и выработку электроэнергии ГТУ.

В 2022 году с началом специальной военной операции закупка и поставка ремонтного комплекта кассет и каплеуловителей для ОУ ИТ ГТУ от производителя продукции прекратилась. Несмотря на это, в обозначенное договором закупки время на ряд ТЭЦ поступили запрашиваемые

техническим заданием кассеты с паспортом дистрибьютора компании Munters из Санкт-Петербурга. При этом прилагалось письмо компании Munters, датированное 2018 годом, подтверждающее полномочия компании как их официального дистрибьютора.

При установке этих новых кассет на ОУ ИТ ГТУ был отмечен увеличенный перепад давления по сравнению с ранее используемыми кассетами Munters и проводшими в эксплуатации несколько лет [4]. Далее, в процессе мониторинга кассет на ряде ТЭЦ было зафиксировано интенсивное разбрызгивание цикловой воды перед и за ОУ ИТ ГТУ (*фото 7.12*).



а)



б)

Фото 7.12. Разбрызгивание воды: а) перед ОУ ИТ ГТУ; б) за ОУ ИТ ГТУ

Этот факт мог говорить о том, что материал сотового увлажнения (МСУ) поставленных кассет не впитывает в должной мере цикловую воду, подаваемую через коллекторы ОУ ИТ, а отражает ее от своей поверхности.

При этом резко возрос расход цикловой воды, обеспечивающей работу ОУ ИТ ГТУ. После таких результатов начала эксплуатации установка кассет на другие ОУ ИТ ГТУ была запрещена, а поставщик отозвал кассеты, отправленные на ГРЭС в Ставропольский край.

Для выяснения причин повышенного перепада давления на вновь поставленных кассетах по сравнению с бывшими в эксплуатации длительное время, выброса цикловой воды, подаваемой в ОУ ИТ вверх и вниз по потоку, приводящего к повышенному расходу воды на ОУ ИТ ГТУ был выполнен ряд исследований на оборудовании ООО «Фильтрационные Технологии».

Перед инструментальным тестированием МСУ новых кассет был проведен их визуальный осмотр и сравнение с образцами МСУ кассет компании Munters, бывшими в эксплуатации. На *фото 7.13* разным цветом показаны линии укладки МСУ двух кассет.

Очевидно, что укладка материала в кассетах компании Munters кардинально отличается от укладки МСУ новых кассет.

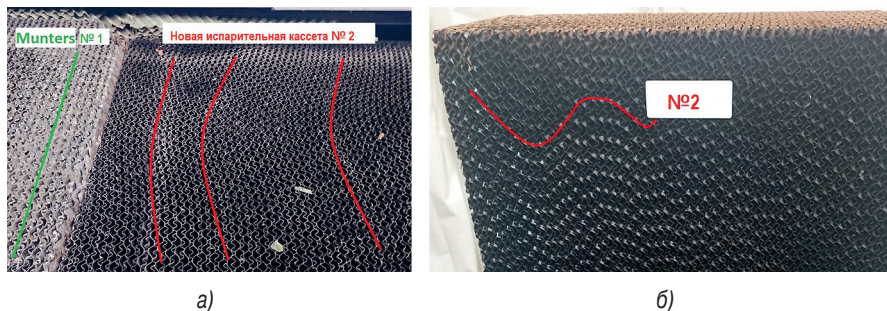


Фото 7.13. Сравнение укладки МСУ: а) кассета № 1 TURBOdek Munters и новая кассета □ 2 (продольное сечение); б) кассета № 2 новой поставки (поперечное сечение)

Другой характерной особенностью кассет Munters является разный цвет слоев МСУ: бежевый чередуется с зеленым (фото 7.14). На фото 7.13б отчетливо видно, что на новой кассете № 2 зеленый цвет МСУ отсутствует.

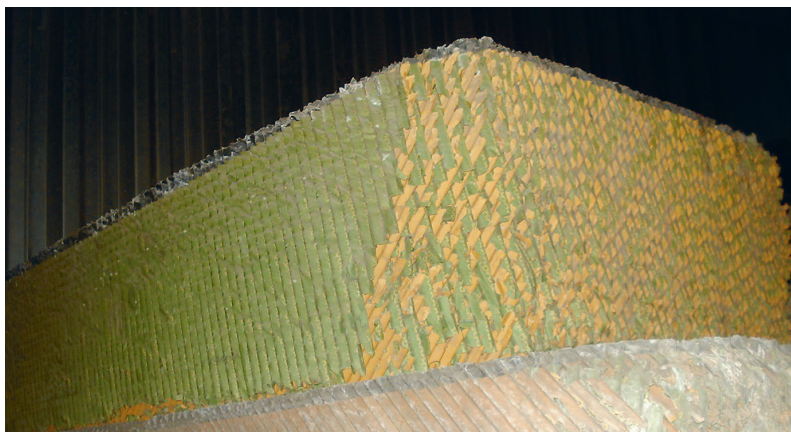


Фото 7.14. Слои МСУ кассеты Munters

Для повышения прочности МСУ от внешних воздействий во время эксплуатации Munters укрепляет их на входе воздушного потока. С этой целью входная кромка МСУ погружается в емкость со специальным веществом. После пропитки этой части МСУ приобретает прочность и износостойчивость. Защитный слой входной кромки новых кассет № 2 нанесен распылом, а не погружением в укрепляющий раствор, как это сделано на кассетах Munters (фото 7.15).

Такой подход значительно упрощает и удешевляет технологический процесс изготовления, но при этом снижает надежность МСУ.

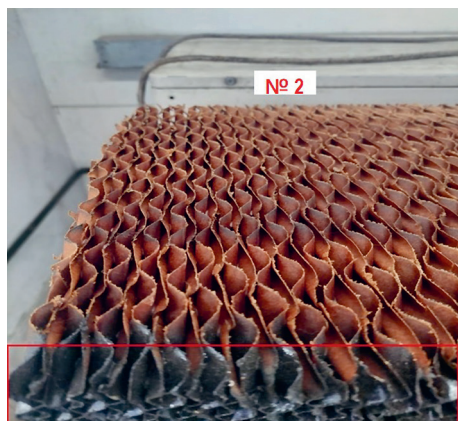


Фото 7.15. Защитный слой края МСУ новых кассет

Далее был выполнен сравнительный анализ массогабаритных показателей новой кассеты № 2 и ранее зафиксированных параметров аналогичной новой кассеты Munters (табл. 7.2).

Отмечается значительное расхождение масс двух кассет. Путем несложных расчетов находим плотность МСУ образца № 2.

На основании результатов внешнего осмотра МСУ и сравнения их с оригинальными кассетами Munters стало возможным предположить, что, несмотря на паспорт дистрибьютора компании Munters, сопровождающий новые кассеты, это два разных производителя данных изделий.

Однако окончательный вывод о принадлежности предоставленных кассет можно было сделать только после их инструментальных замеров и тестирования на аэродинамическом стенде.

Таблица 7.2

Массогабаритные показатели новых кассет Munters и образца № 2

	Munters new	Образец № 2
Габаритные размеры (В×Ш×Д), мм	1360×600×300	1355×595×298
Масса, кг	7,40	10,59
Плотность МСУ, кг/м³	30,22	44,12

В качестве образца МСУ кассет Munters (№ 1) была выбрана кассета с ТЭЦ, бывшая в эксплуатации в течение пяти весенне-летних сезонов на ОУ ИТ ГТУ.

После определения массогабаритных показателей кассет был выполнен замер углов укладки и высоты гофр МСУ (фото 7.16 и 7.17). Результаты замеров представлены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Результаты инструментального контроля параметров МСУ

	Образец № 1	Образец № 2
Габаритные размеры (В×Ш×Д), мм	1360×600×300	1355×595×298
Масса, кг	18,50	10,59
Толщина бумаги, мм	0,18	0,18
Углы укладки гофрированных листов бумаги, град.	45/15	51/11
Суммарный угол укладки гофрированных листов бумаги, град.	60	62
Высота гофры листов, уложенных под углом 45° (15°) к лицевой поверхности (вход воздуха), мм	5 (7)	6,5 (4,5)

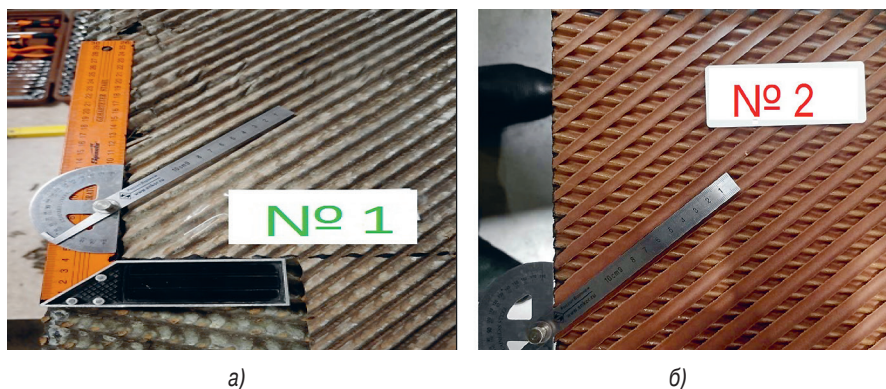


Фото 7.16. Проверка углов укладки МСУ: а) образец № 1 – кассета Munters; б) образец № 2 – новая кассета



Фото 7.17. Размеры гофр МСУ новых кассет: а) измеряемые размеры; б) инструментальный замер

Затем из обеих кассет были вырезаны фрагменты МСУ размером $600 \times 600 \times 300$ мм с площадью входного сечения $0,36$ кв. м для тестирования на аэродинамическом стенде. Для обеспечения корректности измерений во время тестирования, предотвращения разрушения МСУ и возможных протечек потока воздуха, образцы № 1 и № 2 были помещены в специально изготовленные боксы из нержавеющей стали и герметично установлены в креплении стенда (фото 7.18).

Таблица 7.4

Сравнение перепада давления на образцах с данными, приведенными в паспортах кассет Munters*

	Munters*	Образец № 1	Образец № 2
Перепад давления при скорости 2,5 м/с, Па	≤ 53	85	91
Состояние	новый	5 сезонов	новый



Фото 7.18. Тестирование образцов 1 и 2 на аэродинамическом стенде

Тестирование МСУ осуществлялось в диапазоне от 425 до 5100 м³/ч по двенадцати точкам с шагом 425 м³/ч. Результаты тестирования представлены в табл. 7.4.

Полученные результаты красноречиво говорят, что перепад давления на образце № 2 более чем в 1,7 раза превышает аналогичный параметр на новых кассетах Munters. Более того, начальный перепад давления на новом образце № 2 выше, чем на кассете Munters, бывшей в эксплуатации пять весенне-летних сезонов на ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ.

Последним показателем в процессе исследований было определение горючести МСУ кассет. Известно, что кассеты, изготовленные из стекловолокна, не подвержены горению на открытом огне, а кассеты из целлюлозы горят. Для определения горючести МСУ образца № 2 из кассеты вырезался кубический фрагмент материала размером 100×100×100 мм и массой 44,2 г. Фрагмент помещался на металлический поддон и поджигался газовой горелкой с фиксацией времени горения (фото 7.19а).

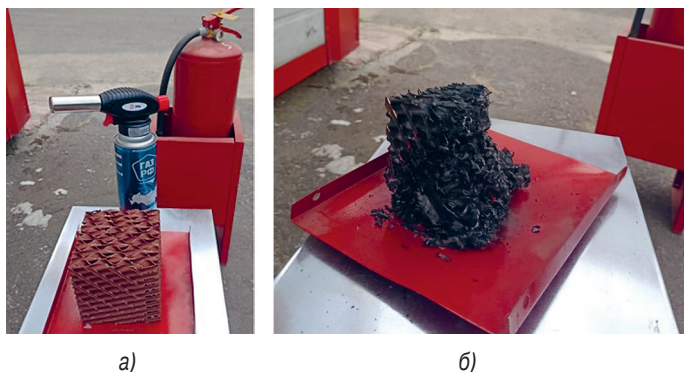


Фото 7.19. Тестирование фрагмента МСУ образца № 2 на горючесть: а) перед тестом; б) после теста

В процессе испытаний было установлено, что МСУ образца № 2 горюч. Время горения образца размером 100×100×100 мм — 3:38 сек. При отсутствии открытого огня происходит тление материала до полного разрушения (фото 7.19б).

По результатам теста с большой степенью вероятности можно предположить, что МСУ образца № 2 изготовлен из целлюлозы.

Анализируя результаты внешнего осмотра и выполненных исследований МСУ образца № 2, можно констатировать:

- технические характеристики объекта испытаний не соответствуют большинству заявленных в паспорте параметров изделия, представленного дистрибьютором компании Munters;
- компания Munters не является производителем предоставленного на исследование МСУ;
- паспорт на изделие, представленный дистрибьютером компании Munters, не соответствует поставленным изделиям;
- данный вид МСУ не используется в ОУ ИТ ГТУ, а применяется в агропромышленном комплексе (животноводческие и птицеводческие хозяйства);
- на основании аналитического обзора аналогичной продукции иностранных производителей с высокой степенью вероятности можно предположить, что производителем этого МСУ является индийская компания DRI (Desiccant Rotors International).



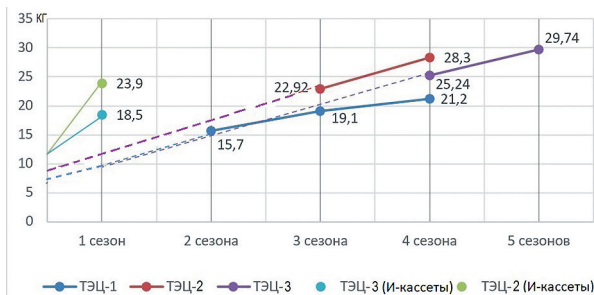
Фото 7.20. Сильное загрязнение МСУ И-кассет

Назовем изделия этого производителя И-кассетами. При дальнейшем мониторинге этих изделий в процессе эксплуатации на ТЭЦ было отмечено интенсивное загрязнение МСУ (фото 7.20).

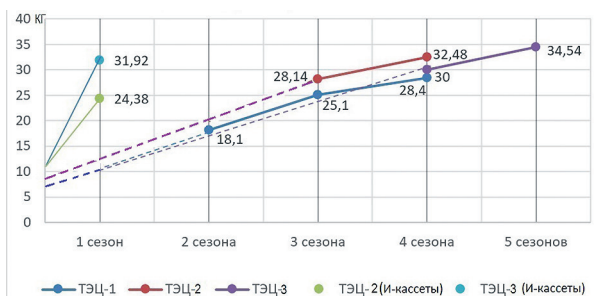
При этом следует отметить, что штатная защита от двукрылых насекомых и плодов цветения растений в виде противомоскитных сеток была установлена.

После весенне-летнего сезона эксплуатации ОУ ИТ ГТУ на ТЭЦ с И-кассетами последние были взвешены. На рис. 7.21 представлены графики изменения массы И-кассет размером 1360×600×300 мм и 1500×600×300 мм на ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 за один весенне-летний сезон эксплуатации. На ОУ ИТ ТЭЦ-1 были установлены кассеты Munters того же размера. Ранее на всех ОУ ИТ ГТУ применялись только кассеты Munters.

Как видно из приведенных графиков мониторинга массы кассет по сезонам эксплуатации на ОУ ИТ, загрязнение И-кассет происходило более интенсивно, чем кассет Munters. Только за один сезон эксплуатации масса И-кассет достигла значений, соответствующих массе кассет Munters через четыре сезона на тех же ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3. Различные значения массы И-кассет одного размера на этих ТЭЦ обусловлены разной интенсивностью использования ОУ ИТ ГТУ. Причем на ТЭЦ-2 отмечается практически равномерное загрязнение МСУ кассет разных размеров, а на ТЭЦ-3 эти значения существенно отличаются.



а)



б)

Рис. 7.21. Мониторинг изменения массы кассет Munters и И-кассет:
а) размером 1360×600×300 мм; б) размером 1500×600×300 мм

На основании выполненных исследований можно констатировать:

1. Причиной повышенного перепада давления на И-кассетах, неполной впитываемой цикловой воды, интенсивного загрязнения являются синусоидальная укладка, неоптимальные высота гофр, углы укладки и плотность МСУ.

2. Опыт поставки иностранных кассет и каплеуловителей для ОУ ИТ энергетических ГТУ показал, что паспорт на изделия должен предоставлять не дистрибьютор производителя, а сам производитель продукции. В противном случае возможны поставки контрафактных или не соответствующих техническому заданию изделий.

3. При поступлении изделий на предприятие необходим не только тщательный визуальный входной контроль, но и при необходимости инструментальное тестирование изделий.

Для уменьшения повреждений кассет ОУ ИТ ГТУ и повышения их эффективности целесообразно рекомендовать следующие организационно-технические мероприятия:

– проанализировать рынок производителей и поставщиков материалов сотового увлажнения и кассет с целью оптимального выбора изделий;

– перед установкой новых кассет их необходимо пронумеровать, чтобы каждый раз помещать на обозначенное место на конкретном ярусе и всасе. Это позволит отказаться от подрезания и подгонки рядом стоящих кассет;

– выработать технические решения, позволяющие минимизировать повреждаемость кассет при их установке и снятии;

– разработать технические решения, позволяющие снизить загрязнения поверхности кассет от тополиного пуха, плодов цветения растений и от двукрылых насекомых;

– оценить стойкость материала кассет к внешним климатическим воздействиям и огню;

– выполнить научно-исследовательскую работу по определению влияния углов установки листов материала в кассетах на перепад давления и эффективность впитываемости цикловой воды;

– разработать более прочную конструкцию каплеуловителей ОУ ИТ.

Умный человек всегда
может исправить свои ошибки,
а глупый не в силах их даже признать
Омар Хайям

ГЛАВА 8

Технические решения по защите материала кассет от повреждений и загрязнений, повышению прочности и долговечности каплеуловителей ОУ ИТ ГТУ

8.1. Анализ рынка производителей и поставщиков материалов сотового увлажнения и кассет для ОУ ИТ

Основным элементом ОУ ИТ, на котором происходит испарение подаваемой в установку воды, является материал сотового увлажнения (МСУ). На *рис. 8.1* схематично представлены основные зарубежные и отечественные производители, а также поставщики МСУ и кассет из этого материала (КСУ) для ОУ ИТ.

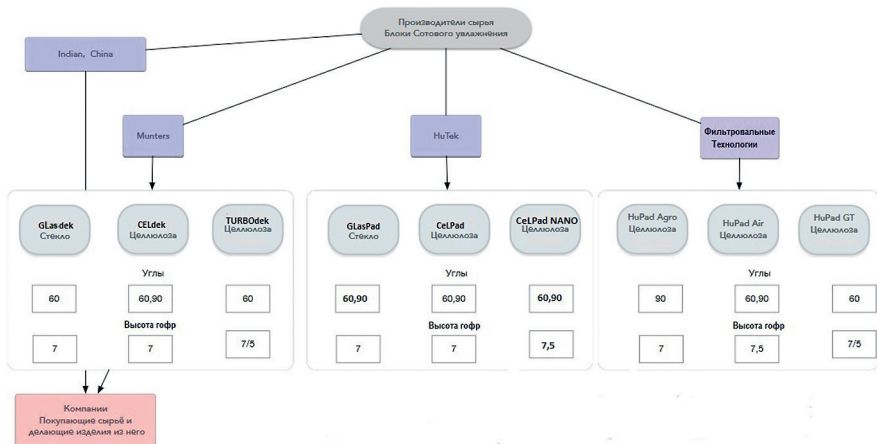


Рис. 8.1. Схема производителей и поставщиков материалов сотового увлажнения и кассет для ОУ ИТ

К ним относятся представители азиатских стран с высокотемпературными климатическими условиями, где эти изделия наиболее востребованы, а также европейская компания из Швеции Munters, основатель которой Carl Munters запатентовал первую в мире ОУ ИТ, работающую по адиабатическому циклу. В 2024 году отечественная компания ООО «Фильтрационные технологии» открыла производство МСУ на своем заводе в Тольятти.

Существует небольшое количество отечественных и компаний из ближнего зарубежья, которые покупают готовый МСУ и комплектуют из него кассеты для ОУ ИТ в основном для аграрного сектора экономики (птицефабрики, свиноводство и т. д.).

Основным производителем и поставщиком ОУ ИТ для энергетических ГТУ на российские ТЭЦ являлась компания Munters. Проанализируем материал и конструктивное исполнение кассет сотового увлажнения этой компании, которая разработала и производит три вида кассет МСУ для ОУ ИТ (*фото 8.2*). На отечественные ТЭЦ компания Munters поставляла ОУ ИТ, оснащенные КСУ из материала TURBOdek®.

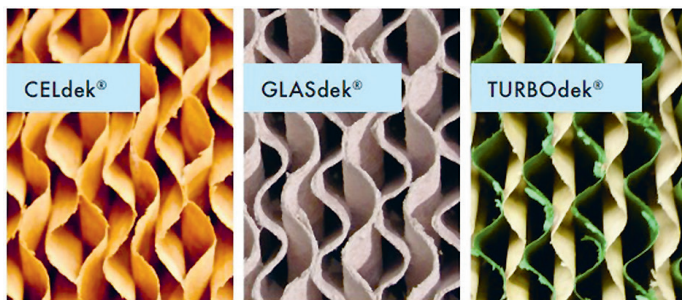


Фото 8.2. Материал кассет СУ для ОУ ИТ компании Munters [www.munters.com]

TURBOdek® — материал с низким перепадом давления и высокой эффективностью, обеспечивающей проектное охлаждение циклового воздуха ГТУ при повышенных температурах окружающей среды [1]. Ниже приведены расчетные данные эффективности кассет и перепада давления МСУ TURBOdek® в зависимости от скорости потока воздуха на входе (*рис. 8.3*).

TURBOdek® имеет запатентованную компанией Munters конструкцию неравномерных углов и канавок для высокоскоростного испарительного охлаждения до 4 м/с (*рис. 8.4*). При более высоких скоростях воздушного потока происходит срыв капельной влаги с материала.

TURBOdek® изготовлен из плотного целлюлозного материала, обработанного специальным раствором для предотвращения износа и продления срока службы. По краям материал пропитан покрытием, защищающим от водорослей и атмосферных воздействий, облегчающим очистку и обслуживание. TURBOdek® имеет сертификат Greenguard Gold, что подтверждает

низкий уровень выбросов химических веществ из этого материала. Увеличение содержания водяного пара в воздушном потоке приводит к снижению количества оксидов азота, образующихся в процессе сгорания. Целлюлозный материал TURBOdek® горюч.

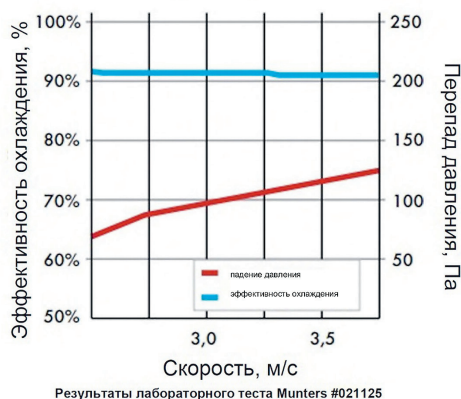


Рис. 8.3. Кривые эффективности МСУ TURBOdek® толщиной 300 мм [1]

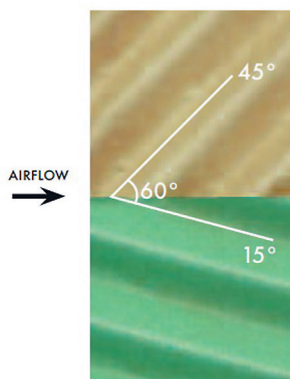


Рис. 8.4. Углы укладки слоев МСУ TURBOdek® [1]

Munters утверждает, что уникальная самоочищающаяся конструкция TURBOdek® обеспечивает значительное повышение эффективности охлаждения при давлении менее 55 Па, скорости потока 2,5 м/с и КПД 92%. Опыт эксплуатации таких кассет на ОУ ИТ ГТУ ПАО «Мосэнерго» это не подтвердил [2]. Согласно паспортным данным, ОУ ИТ ГТУ на ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» кассеты TURBOdek® с размерами (Н×W×D) 1500×600×300 мм и 1360×600×300 мм имеют эффективность более 90% и перепад давления не более 53 Па при скорости потока 2,5 м/с. При этом высота гофр двухслойного материала (отличающегося по цвету: бежевый и зеленый) равна 5 мм и 7 мм (рис. 8.5а) Для равномерного распределения подаваемой воды по поверхности КСУ используют водораспределительные кассеты CELdek® с размерами (А×В×С) 600×300×50 мм (рис. 8.5б).

Кассеты СУ GLASdek® изготавливаются из стекловолокна и характеризуются высокой эффективностью испарения, огнестойкостью, высокой фронтальной скоростью и низким перепадом давления. Углы укладки слоев материала такие же, как и у TURBOdek®, но с высотой гофр 7 мм.

Конструкция неравномерных канавок Munters с небольшим углом наклона позволяет воздуху проходить с высокой скоростью через материал без существенного сопротивления или переноса капель воды. Самоочищающаяся конструкция GLASdek® предотвращает засорение, вызванное пылью, песком или другим мусором. Благодаря такой конструкции, большее количество воды направляется на входящую в воздух поверхность кассеты и смывает грязь и мусор, обеспечивая при этом максимальную эффективность охлаждения (рис. 8.6).

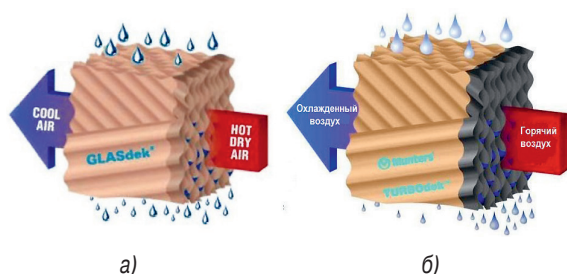


Рис. 8.6. Кассеты сотового увлажнения компании GLASdek®: а) без TUFedg®, б) с TUFedg®

Кассеты СУ нового поколения GLASdek® GX30 обладают повышенной прочностью и долговечностью при исключительных показателях охлаждения и увлажнения благодаря своей конструкции и технологии производства. Они изготовлены из огнестойкого материала, обогащенного специальными отвердителями, и предназначены для испарительного охлаждения и увлажнения воздуха в тех случаях, когда требуется строгое соблюдение правил пожарной безопасности.

Для увеличения срока службы этих кассет Munters предлагает использовать опцию TUFedg®, обеспечивающую защитное покрытие кромок, устойчивость к водорослям и атмосферным воздействиям, очистку материала. Опция предполагает жесткую и эластичную обработку кромок поверхности МСУ, на которую поступает воздух. Она разработана таким образом, чтобы выдерживать многократную очистку без повреждения кассеты. Материал Munters TUFedg® непористый, быстро сохнет, предотвращает прилипание водорослей и минералов, поэтому при высыхании они отслаиваются. TUFedg® также защищает МСУ от вредного воздействия сложных погодных условий

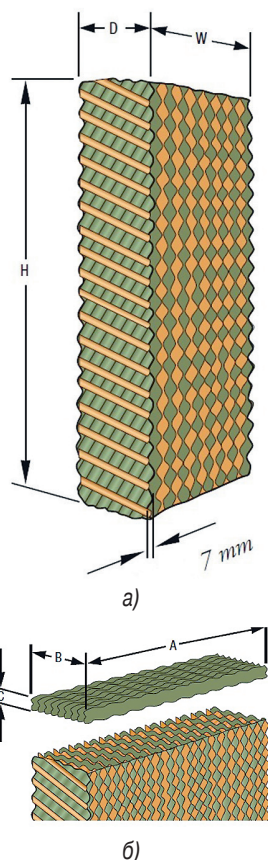


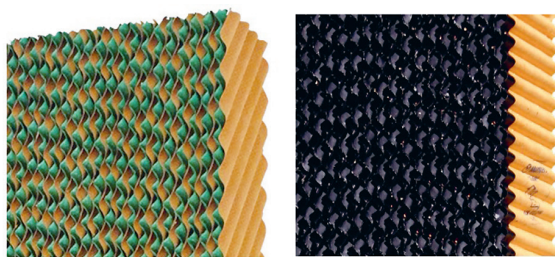
Рис. 8.5. Размеры КСУ компании Munters: а) испарительной, б) водораспределительной

и длительного контакта с ультрафиолетом. Это защитное покрытие краев материала продлевает срок службы кассет (рис. 8.6б).

CELdek® кассета СУ применяется в случае необходимости высокоэффективного охлаждения при повышенной скорости движения воздуха, в частности в агропромышленной отрасли (птицеводство, животноводство, тепличное хозяйство), а также в промышленных помещениях.

Munters утверждает, что эти кассеты обладают теми же исключительными свойствами, что и вышеперечисленная продукция этой компании. Кассеты CELdek® изготовлены из специальным образом пропитанной целлюлозы (рис. 7а). Гофрированные листы этого МСУ быстро впитывают воду и образуют сплошную контактную поверхность между воздухом и водой. На входные кромки кассет CELdek® наносится защитное покрытие MI-T-edg®, позволяющее выдерживать многократную чистку и предотвращать прилипание к ней водорослей. Это покрытие также защищает материал кассет CELdek® от разрушительного воздействия суровых климатических условий и продляет срок службы (рис. 8.7б).

Высота гофр CELdek® составляет 7 мм, а углы пересечения укладки листов материала показаны на рис. 8.8.

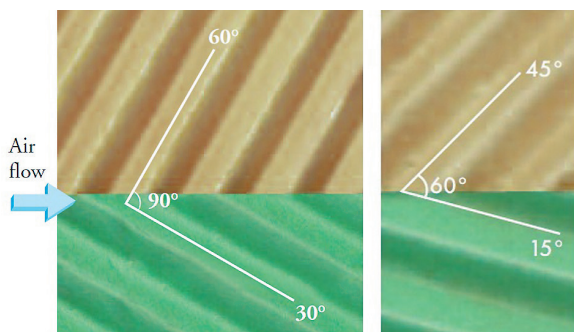


а)

б)

Рис. 8.7. Кассеты CELdek®:

а) без покрытия; б) с покрытием MI-T-edg®



а)

б)

Рис. 8.8. Углы укладки листов материала в кассетах CELdek®:

а) 90° (60° и 30°); б) 60° (45° и 15°)

Кассеты CELdek® и GLASdek® с покрытием MI-T-edg®, как и кассеты TURBOdek®, имеют сертификат Greenguard Gold.

Для увлажнения воздуха и снижения его температуры компания Munters рекомендует использовать свои кассеты из МСУ CELdek® или GLASdek® (рис. 8.9).

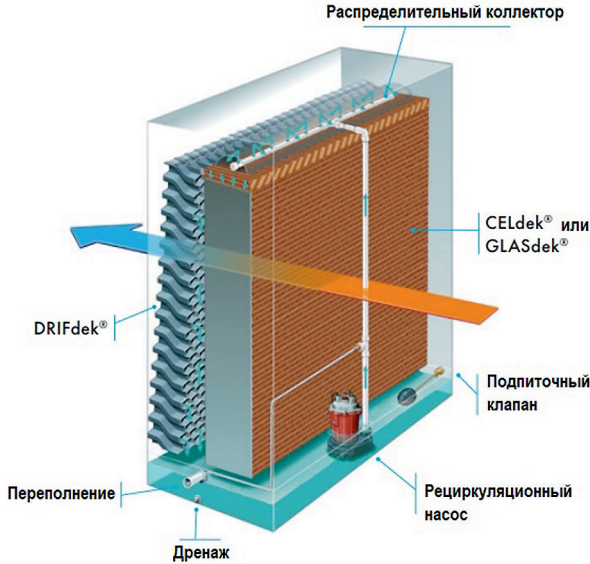


Рис. 8.9. Модуль ОУ ИТ компании Munters

Для предотвращения проникновения капельной влаги за КСУ при скоростях воздушного потока более 4 м/с в ОУ ИТ предусмотрен каплеуловитель DRIFdek-IL двух типоразмеров 1500×700×125 мм и 1500×600×125 мм.

Другим известным производителем МСУ и КСУ для ОУ ИТ является компания HuTek (Asia) Company Ltd. | Industrial climate control Expert. Это совместное тайско-шведское предприятие по разработке и производству климатического оборудования. Компания позиционирует себя лидером в области производства климатического оборудования, что обусловлено сочетанием высоких шведских технологий и двадцатилетнего опыта тайских специалистов в области мониторинга экстремальных климатических условий [3].

HuTek, как и Munters, производит КСУ из материала на целлюлозной основе с комплексом активных добавок (CeLPad), повышающих устойчивость к микробиологической активности, и из стекловолокна (GLasPad). Кассеты CeLPadNANO являются продуктом усовершенствованной технологии по ряду гигиенических параметров, в частности грибостойкости. Материал сотового охлаждения CeLPadNANO успешно прошел испытания на устойчивость к росту плесневых грибов штамма *Aspergillus niger* ГОСТ

9.049–91 «Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов» в испытательной лаборатории ООО «Национальная биотехнологическая компания», аттестат аккредитации № RA.RU.21НБ01.

Панели CeLPad представляют собой ячеистую структуру из гофрированных целлюлозных листов, пропитанных специальным скрепляющим составом, который увеличивает абсорбционную способность. Листы склеены друг с другом под определенными углами для наибольшей эффективности насыщения и минимального аэродинамического сопротивления. Благодаря пропитке, материал становится прочной самонесущей конструкцией с длительным сроком эксплуатации, защищенной от естественных деформаций и разрушения, с высокой абсорбционной способностью (рис. 8.10).

Кассеты CeLPad применяются во многих отраслях, но идеально подходят для охлаждения животноводческих, птицеводческих ферм, теплиц, выращивания сельскохозяйственных культур. В качестве промышленного применения: жилые и коммерческие здания, супермаркеты, а также охлаждение воздуха для ГТУ.

Для повышения прочности и срока службы кассет CeLPad на кромки МСУ наносится покрытие Black+, обеспечивающее их защиту, устойчивость к водорослям и атмосферным воздействиям (рис. 8.10б, в).

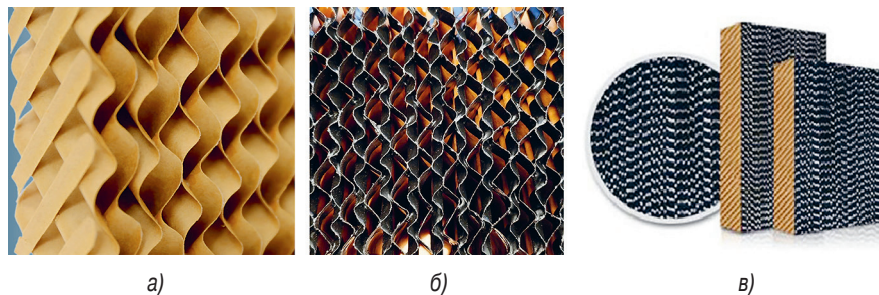


Рис. 8.10. МСУ компании NuTek: а) CeLPad без пропитки входных кромок; б, в) CeLPad с пропиткой входных кромок Black+

CeLPad Black+ — это оптимальный испарительный охлаждающий элемент на входе ГТУ, используется на текстильных фабриках, а также в условиях, где высок риск роста водорослей и бактерий, в местах, подверженных песчаным бурям. Благодаря специальному защитному покрытию, поверхность CeLPad Black+ не позволит водорослям, бактериям или минеральным отложениям закрепиться. Они легко исчезнут, когда прокладка высохнет. Поверхность можно многократно легко очищать без повреждения, а специальное защитное покрытие увеличит срок службы CeLPad.

CeLPad имеет две основные конфигурации с одинаковой высотой гофра МСУ 7 мм. CeLPad 0760 — конфигурация суммарного угла укладки слоев

материала 60° ($45^\circ/15^\circ$). Разработан для минимизации падения давления на охлаждающей кассете (рис. 8.11а). Подходит для оборудования с высокой скоростью воздушного потока.

CeLPad 0790 — конфигурация суммарного угла укладки слоев материала 90° ($45^\circ/45^\circ$). Разработан для максимизации эффективности испарения путем создания большего времени контакта между воздухом и водой для лучшего испарения (рис. 8.11б). Подходит для типичного применения в конструкциях с умеренной скоростью воздушного потока, например в птицеводстве и теплицах.

Материал сотового увлажнения GLasPad создан для более эффективного высококачественного испарительного охлаждения и увлажнения. GLasPad изготовлен из специального пропитанного стекловолоконного материала, который обеспечивает высокую способность впитывания влаги, гарантируя таким образом постоянное увлажнение и эффект испарительного охлаждения даже при высокой скорости воздушного потока.

GLasPad имеет специальный неорганический состав, поэтому он огнестоек и не горюч. Предназначен для безопасного и эффективного увлажнения и охлаждения воздуха в зданиях и помещениях с помощью вентиляционных установок, а также для ОУ ИТ ГТУ. Для обеспечения максимальной долговечности кассет GLasPad они могут устанавливаться в рамную систему PadPluse, которая обеспечит защиту материала от повреждений при установке и снятии кассет, а также в процессе эксплуатации (рис. 8.12). Рамная система легко разбирается, что позволяет быстро проводить замену КСУ. Кассеты CeLPad также могут легко устанавливаться в ОУ ИТ с помощью PadPlus.

За счет особой структуры материал обладает высокими характеристиками увлажнения воздуха при малом аэродинамическом сопротивлении. Прочность и долговечность обеспечиваются подбором специальных неорганических компонентов, стойких к постоянному воздействию воды и окружающей среды. В процессе эксплуатации материал не выделяет токсинов и вредных веществ. За счет неорганической основы GLasPad имеет длительный срок эксплуатации — не менее 5 лет при соблюдении требований хранения, правильной

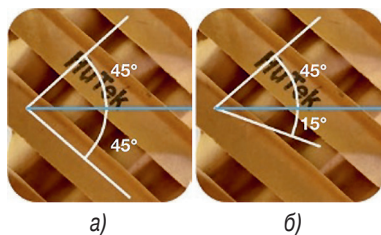


Рис. 8.11. КСУ CeLPad с различными углами укладки: а) $45^\circ/15^\circ$; б) $45^\circ/45^\circ$

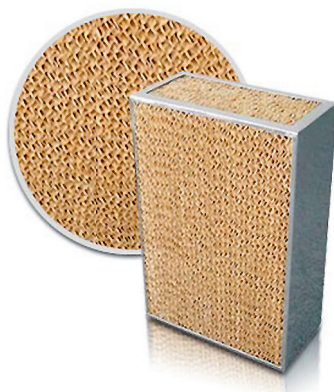


Рис. 8.12. Материал сотового охлаждения GLasPad в PadPluse

установки и обслуживания. KCU GLasPad могут подвергаться регенерации от известкового налета химическими реагентами, что продлевает срок службы материала. MCY GLasPad не содержит опасных для окружающей среды веществ и поэтому может быть утилизирован.

Класс пожаробезопасности MCY GLasPad — A2, S2, DO согласно стандарта EN 1182 и EN 13832 и класс 1 по стандартам UL900/ULC-S111. Материал не является питательной средой для микроорганизмов, инертен к биологической активности по стандарту DIN EN ISO 846, по которому он также не является питательной средой для плесневых грибов. Согласно отчету Шведского национального института испытаний и исследований (SP Technial Research Institute of Sweden), концентрация частиц, утерянных материалом в процессе испытаний, ниже предела обнаружения (тест на отрыв частиц).

Компания HuTek выпускает два варианта KCU с материалами GLasPad — 0760 и 0790. Отличие, как и в случае CeLPad, заключается в разных углах пересечения укладки листов материала или направляющих для потока воздуха и воды при одинаковой высоте гофр (см. рис. 8.11). Нетрудно заметить, что характеристики кассет CeLPad 0760 полностью совпадают с техническими показателями KCU CELdek® компании Munters.

Аналогичная ситуация и со шведскими KCU GLASdek® и кассетами GLasPad компании HuTek. Эти совпадения обусловлены тем, что одна компания шведская, а вторая тайско-шведская. HuTek активно сотрудничает со шведскими специалистами, что отмечено на ее официальном сайте. Следует отметить, что компания Munters отдельно не продает материал GLASdek®, CELdek®, а поставляет только в качестве запасных частей к своим увлажнителям. Компания HuTek, напротив, может продать материал любого размера и толщины. Как правило, толщина кассет бывает 100, 200 и 300 мм. Этот конструктив выбран исходя из расчетных показателей влажности 65, 85, 95% соответственно. Обе компании используют одинаковый материал для изготовления каплеуловителей. Поскольку эти фирмы являются компаньонами, продукция материала KCU очень схожа.

Крупным зарубежным поставщиком оборудования для кондиционирования воздуха на мировой рынок является индийская промышленная группа компаний Pahwa Group, ведущими в которой являются Bry-Air Asia и DRI (Desiccant Rotors International). Bry-Air — поставщик решений для контроля влажности и удаления влаги, осушения, фильтрации газовых фаз, адсорбционного охлаждения и рекуперации высокотемпературного тепла. DRI — поставляет продукты и системы для рекуперации энергии, обеспечения качества воздуха в помещениях, обработки приточного воздуха, испарительного охлаждения. Компания DRI предлагает модули испарительного охлаждения для приточно-вытяжных установок. Модули DRI поставляются в комплекте, включающем охлаждающие кассеты (огнестойкие или горючие на основе целлюлозы) в сборе с каплеуловителями, насосом циркуляционной воды, системой распределения, датчиками, системой управления [4].

Технические характеристики кассет индийского производителя DRI и опыт их эксплуатации на ОУ ИТ ГТУ ПАО «Мосэнерго» представлены в предыдущей главе книги.

На китайском рынке производителей материалов и кассет сотового увлажнения целесообразно отметить несколько компаний. Одна из них — Qingdao Shuangjunli Machinery Co., Ltd специализируется на проектировании, производстве и установке вентиляционного оборудования [5]. На протяжении многих лет она посвятила себя энергосбережению и защите окружающей среды и показала хороший пример в этих направлениях. С момента своего создания она инициативно участвовала в международных коммуникациях и сотрудничестве. Ее продукция достигла международного уровня. На *рис. 8.13* и в *табл. 8.1* представлены технические характеристики производимых этой компанией КСУ из целлюлозы.

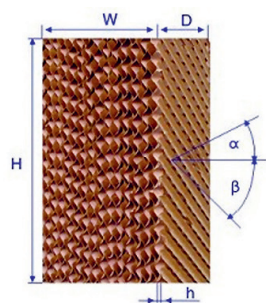


Рис. 8.13. Кассета сотового увлажнения

Таблица 8.1

Технические характеристики китайских кассет сотового увлажнения

	DM760	DM790
H, мм	1500, 1800, 2000	1500, 1800, 2000
W, мм	600	600
D, мм	100, 150	100, 150
h, мм	7	7
α , град.	15	45
β , град.	45	45

Аналогичную продукцию выпускают китайские компании QOMA и Shandong Superherdsman Husbandry Machinery Co., Ltd.

Компания ООО «Фильтрационные технологии» является отечественным производителем материала и кассет СУ из целлюлозы для агропромышленного комплекса, для увлажнения воздуха в промышленных и жилых помещениях, ОУ ИТ энергетических ГТУ [6]. Номенклатура выпускаемой продукции схематично была представлена ранее (см. *рис. 8.1*), а углы установки материала внутри кассет показаны на *рис. 8.14*.

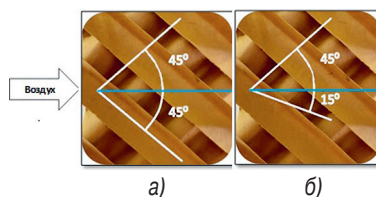


Рис. 8.14. Углы установки материала внутри КСУ: а) 45°/45°; б) 45°/15°

КСУ испарительного охлаждения HuPadAgro изготовлены из органического материала на целлюлозно-бумажной основе. КСУ представляет

собой ячеистую структуру, состоящую из гофрированных (высотой 7 мм) целлюлозно-бумажных листов, пропитанных специальным укрепляющим составом и склеенных друг с другом под углами $45^\circ/45^\circ$, что обеспечивает наибольшую эффективность охлаждения воздуха. Благодаря уникальной пропитке, материал становится прочной самонесущей конструкцией, защищенной от естественной деформации и разрушения, обладающей высокой абсорбционной способностью.

КСУ HuPadAgro применяются в климатических системах, где требуется высокоэффективное охлаждение воздуха. HuPadAgro имеет множество различных вариантов применения, но идеально подходит для охлаждения животноводческих и птицеводческих ферм, теплиц и промышленных помещений различного назначения. С целью обеспечения прочности и долговечности МСУ его края обрабатываются защитным покрытием, как и у известных западных производителей аналогичной продукции (рис. 8.15а).

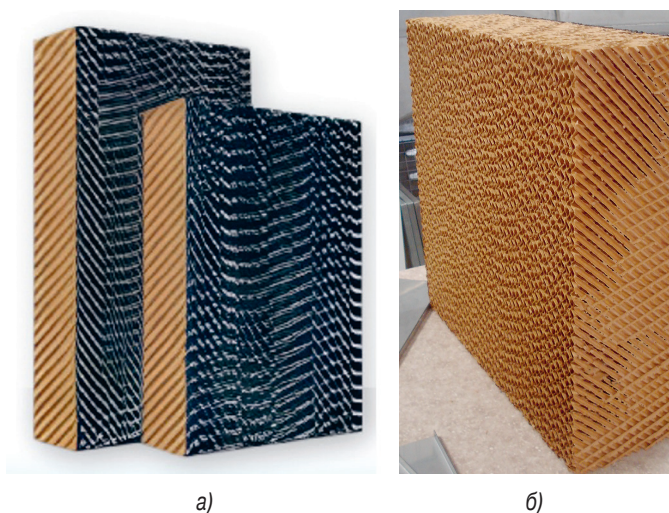


Рис. 8.15. КСУ из целлюлозы: а) HuPadAgro с защитным покрытием; б) HuPadAir

Качество воздуха в помещении является определяющим фактором, влияющим на здоровье людей. Ключевыми параметрами вдыхаемого воздуха являются его влажность и температура. Отклонение этих параметров от комфортных условий негативно влияет на утомляемость людей и, как следствие, на производительность их труда.

Панели испарительного охлаждения HuPadAir эффективно справляются как с охлаждением, так и с увлажнением воздуха, поэтому функционально подходят для использования в системах вентиляции жилых, коммерческих и административных, культурно-досуговых и общественных помещений, а также промышленных зданий.

КСУ HuPadAir изготавливаются из гофрированных (высотой 5 и 7 мм) целлюлозно-бумажных листов, пропитанных специальным укрепляющим составом. Листы склеиваются друг с другом под углами $45^\circ/45^\circ$ и $45^\circ/15^\circ$, что обеспечивает высокую эффективность охлаждения воздуха и малый перепад давления (рис. 8.15б).

Конфигурация КСУ HuPadGT специально разработана для применения в ОУ ИТ газотурбинных установок: листы целлюлозного материала с разной высотой гофр (5 и 7 мм) крепятся относительно друг друга с суммарным углом пересечения воздушных каналов 60° . КСУ HuPadGT сочетает в себе высокую эффективность охлаждения и низкое аэродинамическое сопротивление.

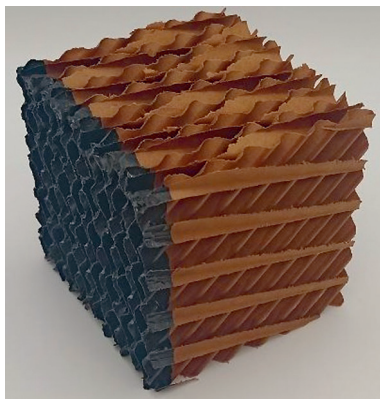


Рис. 8.16. КСУ HuPadGT с пропиткой входной кромки

Материал кассет HuPadGT имеет следующие технические характеристики:

- высота гофр 5 мм / 7 мм;
- углы воздушных каналов $45^\circ/15^\circ$;
- суммарный взаимный угол пересечения воздушных каналов 60° .

Для повышения надежности и долговечности на края КСУ наносится защитное покрытие кромок со стороны входа воздуха (рис. 8.16).

Из-за повреждения большого количества кассет TURBOdek на ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ в 2022 году было принято решение протестировать кассеты отечественной компании ООО «Фильтрационные технологии» на ТЭЦ-3. Кассеты изготовлены из целлюлозных листов с разной высотой гофр. Листы с высотой гофра 5 мм расположены под углом 45° к стороне входа воздуха. Листы с высотой гофра 7 мм установлены под углом 15° к стороне входа воздуха. Целлюлозные листы усилены химической пропиткой для увеличения впитываемости.

Тестировались кассеты размером $1500 \times 600 \times 300$ мм, $1360 \times 600 \times 300$ мм и водораспределительная кассета $600 \times 300 \times 50$ мм. На фото 8.17а, б показаны кассеты $1500 \times 600 \times 300$ мм до и после эксплуатации.

Тестирование кассет продолжалось в течение 1337 часов, после чего был выполнен их внешний осмотр и дефектация. В результате осмотра дефектов или повреждений, препятствующих дальнейшей эксплуатации кассет, не выявлено. Отмечено, что на лицевой стороне кассет имеются незначительные очаги загрязнений тополиным пухом и плодами цветения растений (фото 8.17б).

В главе 2 на рис. 2.4 было показано состояние испарительных кассет Munters на ОУ ИТ ТЭЦ-3 через 1315 часов эксплуатации на водопроводной воде. Сравнивая состояние шведских кассет с тестируемыми кассетами отечественного

производителя на той же ОУ ИТ в течение такого же времени на умягченной воде, нетрудно заметить отсутствие светлых отложений, образующихся в результате оседания солей, содержащихся в водопроводной воде.

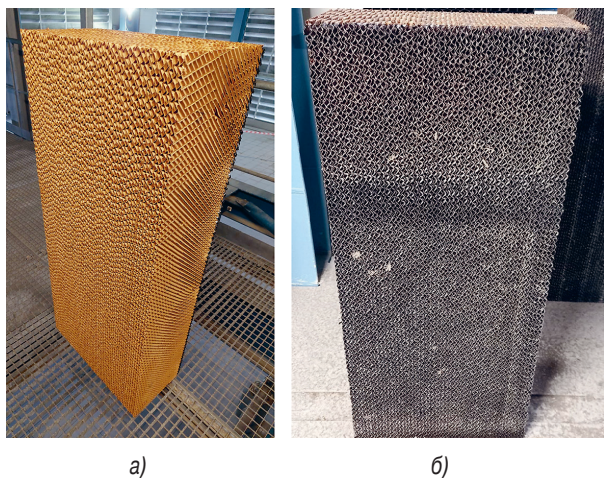


Фото 8.17. Кассеты компании ООО «Фильтрационные технологии»: а) перед установкой; б) после эксплуатации в ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ-3

На основании анализа конструкций и материалов СУ ОУ ИТ различных производителей можно сделать следующие **выводы**:

- кассеты СУ, изготовленные из стекловолокна, обладают повышенной прочностью и долговечностью при исключительных показателях охлаждения и увлажнения благодаря своей конструкции, технологии производства и материалам. Они изготовлены из огнестойкого материала, обогащенного специальными отвердителями и предназначенного для испарительного охлаждения и увлажнения воздуха в тех случаях, когда требуется строгое соблюдение правил пожарной безопасности;

- кассеты СУ, произведенные на основе целлюлозы, представляют собой ячеистую структуру, состоящую из гофрированных листов, пропитанных специальным скрепляющим составом, увеличивающим абсорбционную способность, и склеенных друг с другом под определенными углами для обеспечения наибольшей эффективности насыщения и минимального аэродинамического сопротивления. Эти охлаждающие панели имеют множество различных вариантов применения, но идеально подходят для охлаждения животноводческих, птицеводческих ферм, теплиц и промышленных помещений различного назначения;

- для ОУ ИТ энергетических ГТУ наибольшее применение нашли кассеты СУ, изготовленные из целлюлозного материала, обладающие более низким перепадом давления по сравнению с кассетами из стекловолокна и высокой

эффективностью охлаждения воздуха. Края кассет должны быть обработаны защитным слоем для увеличения срока службы и предотвращения обрастания микроорганизмами;

– для снижения уноса капельной влаги с кассет ОУ ИТ и попадания ее на воздушные фильтры КВОУ ГТУ при нерасчетных скоростях воздушного потока (более 3,5 м/с) необходимо применение каплеуловителей.

8.2. Влияние материала и конструктивных особенностей сотового увлажнения на аэродинамические характеристики охлаждательных установок испарительного типа ГТУ

Как отмечалось ранее, основным проектировщиком и производителем ОУ ИТ энергетических ГТУ для отечественных ТЭЦ была шведская компания Munters. С началом специальной военной операции поставка ремонтного комплекта кассет от производителя прекратилась. Попытки заменить продукцию Munters индийскими изделиями привели к резкому росту перепада давления на ОУ ИТ энергетических ГТУ, снижению эффективности и повышенному расходу цикловой воды. В создавшейся ситуации остро встал вопрос импортозамещения.

Рассмотрим, какой материал применяется для изготовления кассет охлаждения воздуха и на каких ОУ ИТ его целесообразно применять.

Одним из основных показателей ОУ ИТ является перепад давления на кассетах сотового увлажнения (СУ), где происходит испарение подаваемой воды. Материал СУ и конструкция кассет оказывают первостепенное влияние на аэродинамические показатели ОУ ИТ. Проанализируем материалы и конструктивное исполнение КСУ различных производителей.

На рис. 8.18 схематично показаны виды МСУ, углы установки слоев относительно входного потока воздуха и высота гофр МСУ.



Рис. 8.18. Характеристики МСУ: углы установки слоев относительно потока воздуха, высота гофр

Материалом для КСУ может быть стекловолокно (GlasPad) или целлюлоза (CelPad). Как известно, стекловолокно не горит на открытом огне, а целлюлоза — горит. КСУ из стекловолокна обладают повышенной прочностью. Прочностные характеристики и долговечность материала обеспечиваются подбором специальных неорганических компонентов, стойких к постоянному воздействию воды и окружающей среды в целом. В процессе эксплуатации эти кассеты могут подвергаться очистке химическими реагентами от известкового налета, что продлевает срок их службы. Кроме того, стекловолокно не является питательной средой для микроорганизмов, инертно к биологической активности.

КСУ из целлюлозы представляет собой ячеистую структуру из гофрированных листов, пропитанных специальным скрепляющим составом, увеличивающим абсорбционную способность. Листы склеены между собой под определенными углами для наибольшей эффективности насыщения и минимального аэродинамического сопротивления. Благодаря пропитке, материал становится прочной самонесущей конструкцией с длительным сроком эксплуатации, защищенной от естественных деформаций и разрушения, с высокой абсорбционной способностью. Они быстро впитывают воду и образуют сплошную контактную поверхность между воздухом и водой.

Защитное покрытие, нанесенное по краям МСУ, изготовленного из целлюлозы, продлевает срок их службы.

Углы укладки слоев МСУ относительно потока воздуха и высота гофр показаны на *рис. 8.19*.

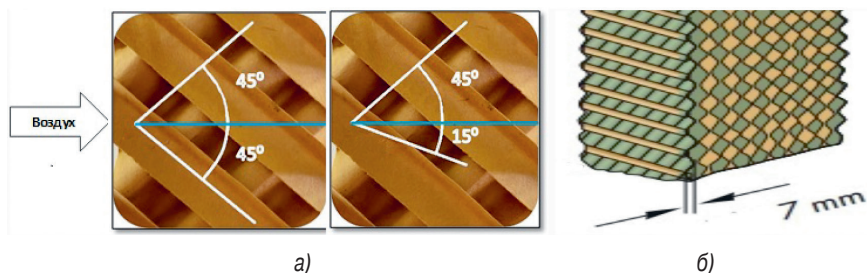


Рис. 8.19. Характеристики МСУ: а) углы установки слоев; б) высота гофр

Суммарно углы установки слоев МСУ в КСУ имеют значения 90° ($45^\circ/45^\circ$) и 60° ($45^\circ/15^\circ$).

Высота гофр МСУ 5 и 7 мм. Для МСУ из стекловолокна используется только одна высота гофр — 7 мм (*рис. 8.19б*).

С целью определения влияния характеристик МСУ на перепад давления ОУ ИТ на аэродинамическом стенде компании ООО «Фильтрационные Технологии» были протестированы 42 образца, отличающиеся типом и толщиной материала, углами установки, высотой гофр [7].

На *фото 8.20* представлены некоторые образцы МСУ, используемых в КСУ, при тестировании на аэродинамическом стенде.

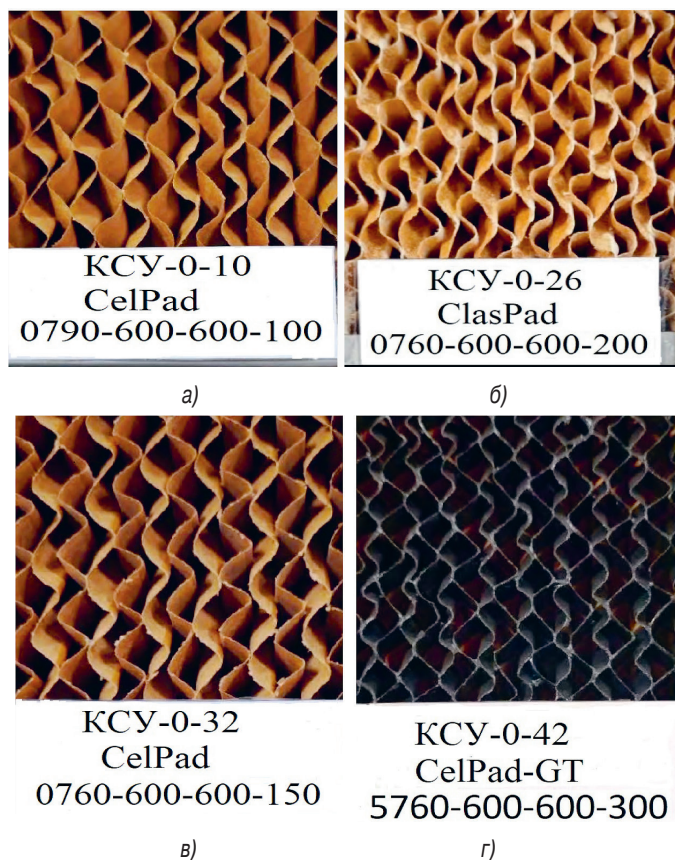
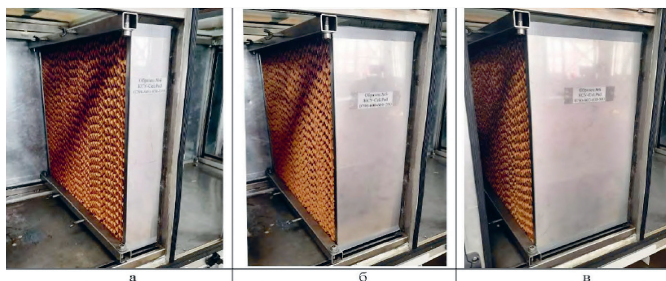


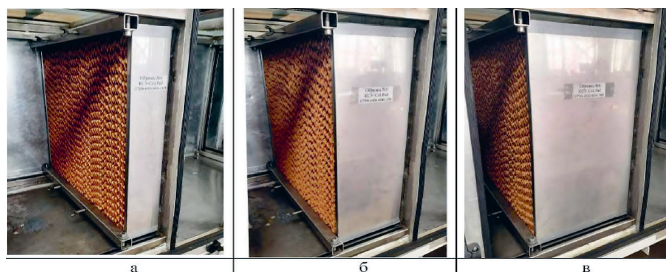
Фото 8.20. Образцы МСУ для тестирования на аэродинамическом стенде: а) КСУ-0-10; б) КСУ-0-26; в) КСУ-0-32; г) КСУ-0-42

Обозначение образцов КСУ включает в себя: тип материала, высоту гофр, суммарный угол установки слоев относительно потока воздуха и габаритные размеры. Таким образом, аббревиатура обозначения образца КСУ-0-42 расшифровывается так: МСУ из целлюлозы, высота гофр одного слоя 5 мм, другого — 7 мм, суммарный угол установки слоев МСУ относительно потока воздуха 60° ($45^\circ/15^\circ$), габаритные размеры $600 \times 600 \times 300$ мм.

Для предотвращения протечек воздуха во время тестирования на аэродинамическом стенде КСУ размещались в корпусах из нержавеющей стали (*фото 8.21*).



а)



б)



в)



г)

Фото 8.21. Образцы МСУ в металлических корпусах на аэродинамическом стенде: а) CelPad 0760; б) CelPad 0790; в) CelPad-GT:5760; г) GlasPad 0790. Для всех фото: а – 100 мм, б – 200 мм, в – 300 мм.

Тестирование КСУ на аэродинамическом стенде осуществлялось в диапазоне расхода воздуха от 450 до 5100 м³/ч. Толщина материала КСУ представлена в табл. 8.2. Графические зависимости перепада давления от расхода воздуха на КСУ с различной толщиной образцов приведены на рис. 8.22–8.27.

Таблица 8.2

Толщина материала КСУ

№	Объекты испытаний						Толщина, мм
1	КСУ-0-1	КСУ-0-8	КСУ-0-15	КСУ-0-22	КСУ-0-29	КСУ-0-36	50
2	КСУ-0-2	КСУ-0-9	КСУ-0-16	КСУ-0-23	КСУ-0-30	КСУ-0-37	70
3	КСУ-0-3	КСУ-0-10	КСУ-0-17	КСУ-0-24	КСУ-0-31	КСУ-0-38	100
4	КСУ-0-4	КСУ-0-11	КСУ-0-18	КСУ-0-25	КСУ-0-32	КСУ-0-39	150
5	КСУ-0-5	КСУ-0-12	КСУ-0-19	КСУ-0-26	КСУ-0-33	КСУ-0-40	200
6	КСУ-0-6	КСУ-0-13	КСУ-0-20	КСУ-0-27	КСУ-0-34	КСУ-0-41	250
7	КСУ-0-7	КСУ-0-14	КСУ-0-21	КСУ-0-28	КСУ-0-35	КСУ-0-42	300

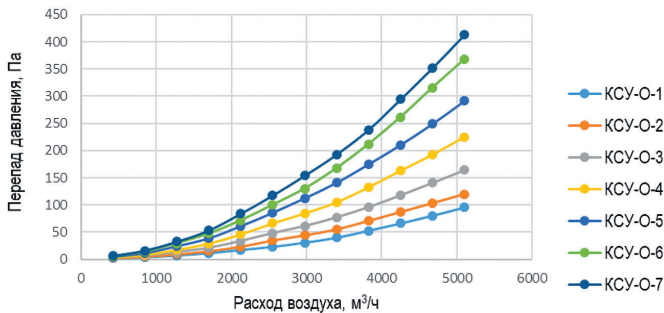


Рис. 8.22. КСУ-0-1...КСУ-0-7, GlasPad 0790

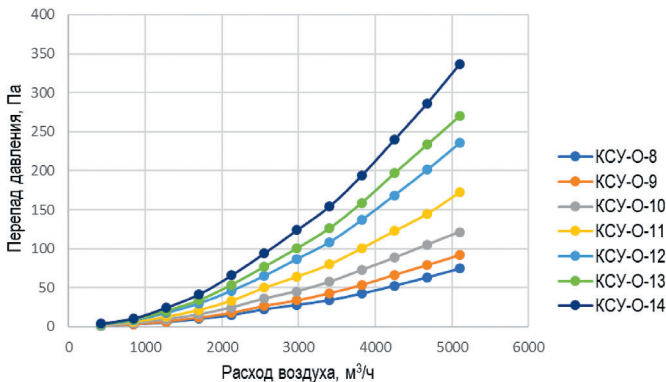


Рис. 8.23. КСУ-0-8...КСУ-0-14, CelPad 0790

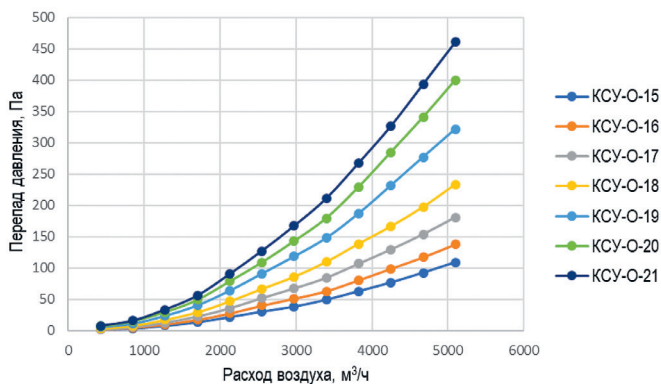


Рис. 8.24. KCU-0-15...KCU-0-21, CelPad 0590

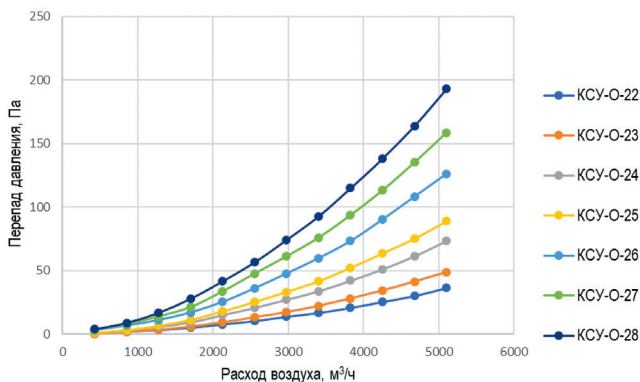


Рис. 8.25. KCU-0-22...KCU-0-28, GlasPad 0760

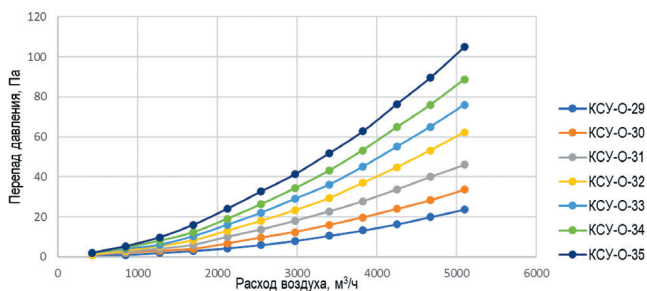


Рис. 8.26. KCU-0-29...KCU-0-35, CelPad 0760

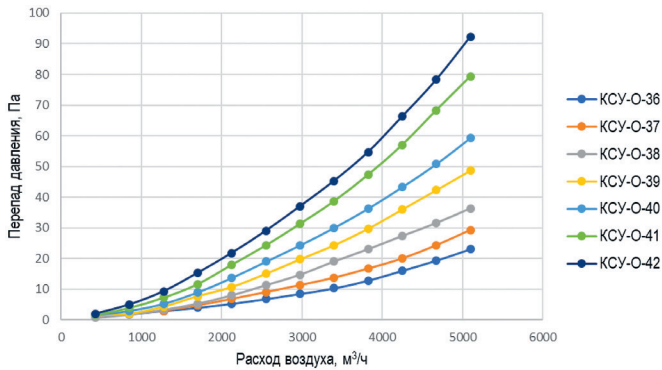


Рис. 8.27. КСУ-0-36...КСУ-0-42, CelPad – GT 5760

Анализ результатов тестирования КСУ, изготовленных из разного материала, на аэродинамическом стенде показывает, что для каждого типа образцов наибольшим перепадом давления обладают изделия толщиной 300 мм. По мере увеличения толщины образца растет и величина перепада давления.

Для обеспечения проектной эффективности испарения влаги на ОУ ИТ толщина МСУ должна быть оптимальной. Как было отмечено в процессе тестирования КСУ, изготовленных из различного материала, чем толще образец, тем выше перепад давления. Для ОУ ИТ энергетических ГТУ, где в процессе испарения участвуют большие расходы воздуха, необходим МСУ увеличенной толщины. Проанализируем перепады давления для КСУ с различными техническими характеристиками, но одинаковой толщиной 300 мм (рис. 8.28).

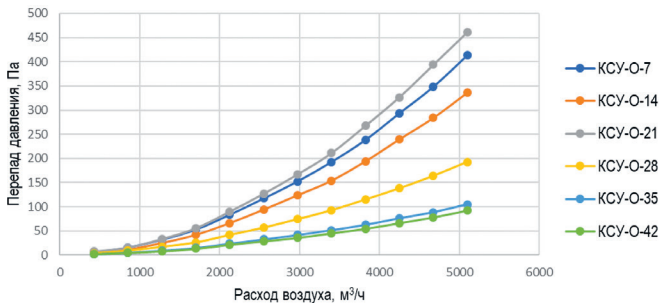


Рис. 8.28. Зависимость перепада давления на КСУ с различными техническими характеристиками от расхода воздуха при толщине материала 300 мм

Как следует из представленных результатов тестов, наибольший перепад давления имеет КСУ-0–7, GlasPad 0790, а наименьший соответствует КСУ-0–42, CelPad-GT 5760. Наибольший перепад давления по сравнению с другими образцами (при одинаковых габаритных размерах) зафиксирован на КСУ-0–15...КСУ-0–21, CelPad, изготовленных из целлюлозы с высотой гофр 5 мм и суммарным углом установки 90° ($45^\circ/45^\circ$).

Наименьший перепад давления отмечен на КСУ-0–36...КСУ-0–42, CelPad-GT также изготовленных из целлюлозы, но с высотой гофр 5 и 7 мм, при суммарном угле установки 60° ($45^\circ/15^\circ$).

КСУ изготовленные из целлюлозы КСУ-0–8...КСУ-0–14 и КСУ-0–29...КСУ-0–35, имеющие одинаковую высоту гофр 7 мм, но разные значения общего угла установки МСУ (90° и 60°), кардинально различаются по величине перепада давления. КСУ с углами установки $45^\circ/45^\circ$ более чем в три раза превышают по перепаду давления образцы с углами установки $45^\circ/15^\circ$.

Для образцов, изготовленных из стекловолокна, наибольший перепад давления имеют КСУ-0–1...КСУ-0–7 с высотой гофр 7 мм и суммарным углом установки 90° ($45^\circ/45^\circ$).

Стекловолоконные КСУ-0–22...КСУ-0–28 с такой же высотой гофр 7 мм, но суммарным углом установки 60° ($45^\circ/15^\circ$) имеют меньший, практически в два раза, перепад давления.

Выводы:

- существенное влияние на величину перепада давления для КСУ вне зависимости от МСУ оказывают общие углы установки и высота гофр;
- для МСУ из стекловолокна с одинаковой высотой гофр наибольшим перепадом давления обладают КСУ с большим суммарным углом установки;
- при одинаковых суммарных углах установки МСУ из целлюлозы наибольший перепад давления зафиксирован для КСУ с меньшей высотой гофр;
- наименьший перепад давления на КСУ, изготовленных из целлюлозы, имеет МСУ с суммарными углами установки 60° и высотой гофр 5 и 7 мм.

8.3. Влияние характеристик и конструктивных особенностей сотового увлажнителя на капиллярную впитываемость материала охлаждающих установок испарительного типа ГТУ

Интенсивность охлаждения циклового воздуха ГТУ зависит от насыщения материала сотового увлажнения влагой через его капилляры. Капиллярные явления обусловлены двумя разнонаправленными силами: сила тяжести заставляет жидкость стекать вниз, а сила поверхностного натяжения двигает воду вверх. Капиллярная впитываемость материала — это свойство пористо-капиллярных материалов поднимать воду по капиллярам. Она характеризуется высотой (уровнем) поднятия воды в капиллярах, количеством поглощенной воды, интенсивностью

всасывания и другими параметрами материала. Чем больше воды поглощается материалом, тем больше ее отдается в атмосферу при испарении.

На эффективность работы ОУ ИТ ГТУ существенное влияние оказывают перепад давления на материале сотового увлажнения и его насыщение влагой. Исследование влияния материала сотового увлажнения на аэродинамические характеристики ОУ ИТ ГТУ представлено в *главе 8.2*. Влияние фактора воды на эксплуатацию ОУ ИТ энергетических ГТУ рассмотрено в *главе 4*.

Капиллярная впитываемость бумаги и картона определяется по методу Клемма согласно ГОСТ 12602–93 (ISO 8787–86) [8]. Метод заключается в испытании полоски материала, один конец которой закреплен вертикально, а другой погружен в воду (водные растворы и др.). Измерения проводят с 10-минутным интервалом.

Объектом испытаний были выбраны образцы бумаги длиной 200 мм и шириной 15 ± 1 мм, нарезанной в поперечном направлении:

Образец № 1 — бумага плотностью 105 г/м², пропитанная фенолформальдегидной смолой (ГОСТ 20907–2016. Смолы фенолформальдегидные жидкие. Технические условия) [9].

Образец № 2 — бумага плотностью 105 г/м², пропитанная составом на основе глиоксильной кислоты. Химический состав является коммерческой тайной производителя.

Образец № 3 — бумага плотностью 95 г/м², пропитанная фенолформальдегидной смолой (ГОСТ 20907–2016).

Образец № 4 — бумага плотностью 95 г/м², пропитанная составом на основе глиоксильной кислоты. Химический состав является коммерческой тайной производителя.

Зададимся вопросом: почему в качестве образцов была выбрана бумага именно такой плотности?

Для различного назначения ОУ ИТ используются материалы, отличающиеся своими физико-механическими свойствами, психрометрической эффективностью и массогабаритными параметрами. Важен баланс этих характеристик, прямое влияние на них оказывает выбор сырья, из которого производится материал сотового увлажнения — тип бумаги, ее плотность и толщина, а также смола, которой она пропитывается. Так, чем выше плотность и толщина бумаги, тем выше ее капиллярная впитываемость, а значит, и психрометрическая эффективность, но при этом возрастает масса материала и увеличивается его аэродинамическое сопротивление.

Сложившаяся мировая практика производства материалов сотового увлажнения учитывает эти нюансы, в связи с чем на производстве используют крафт-бумагу плотностью от 93 г/м² (китайские производители) до 105 г/м² и толщиной 0,17–0,2 мм. Бумага большей плотности и толщины плохо поддается гофрированию в процессе изготовления, а менее плотная и тонкая повреждается при прохождении через нагретые валки с профильной поверхностью. В результате температурного и механического воздействия валков гофрировщика

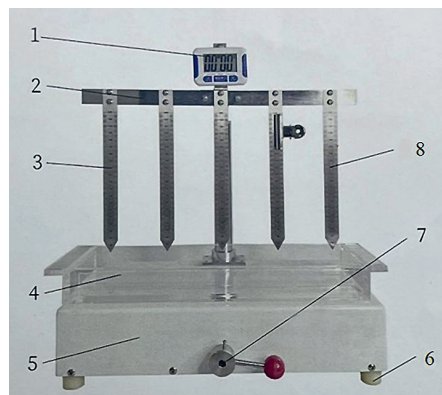


Фото 8.29. Конструкция тестера для измерения водопоглощения ХНВ-12В:
1 – цифровой таймер; 2 – держатель измерительных линеек; 3, 8 – измерительная линейка; 4 – емкость для воды; 5 – корпус; 6 – опора; 7 – поворотная ручка

Перед началом тестов образцы бумаги в сухом состоянии взвешивались на электронных весах (фото 8.30).

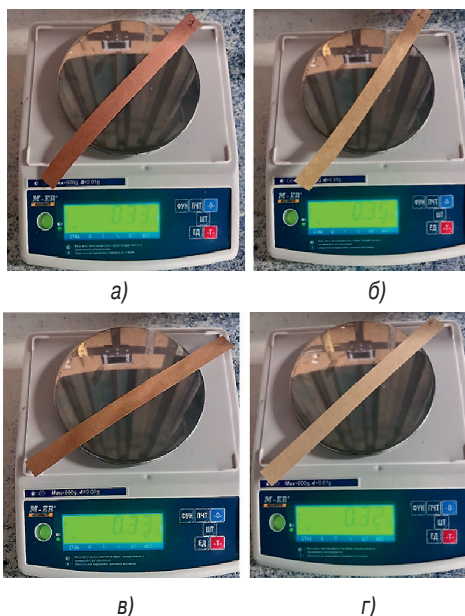


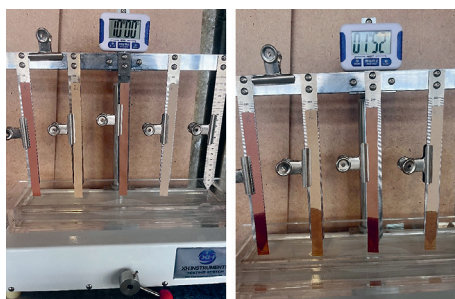
Рис. 8.30. Взвешивание образцов бумаги в сухом состоянии до начала тестирования:
а) № 1; б) № 2; в) № 3; г) № 4

тонкая и менее плотная бумага становится хрупкой и разрушается.

Тестирование образцов бумаги сотового увлажнения на определение капиллярной впитываемости выполнялось по методу Клемма (ГОСТ 12602–93, ISO 8787–86) на приборе ХНВ-12В компании ООО «Умные Системы Климата» (фото 8.29) [10].

Полоски бумаги, подготовленные по ГОСТ 12602–93 (ISO 8787–86), закреплялись на измерительных линейках. Поворотной ручкой опускают держатель измерительных линеек вниз до погружения образцов в воду на 10–15 мм. Время погружения контролируется цифровым таймером, закрепленным на держателе измерительных линеек.

После взвешивания измерялась высота капиллярного подъема воды (фото 8.31), которая фиксировалась с помощью закрепленных на устройстве измерительных линеек с точностью до 1 мм.

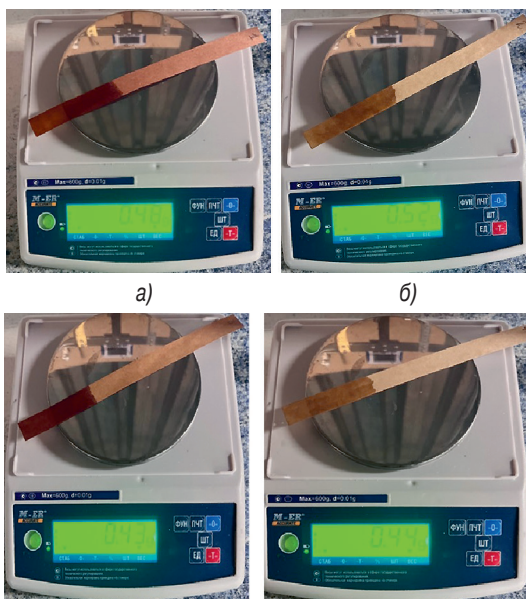


а)

б)

Фото 8.31. Определение капиллярной впитываемости: а) образцы до погружения в воду; б) образцы погружены в воду

После завершения испытаний образцы вновь взвешивались на электронных весах (фото 8.32).



а)

б)

в)

г)

Фото 8.32. Взвешивание образцов бумаги во влажном состоянии после окончания тестирования: а) № 1; б) № 2; в) № 3; г) № 4

В табл. 8.3 представлены сводные результаты испытаний на капиллярную впитываемость образцов и изменение их веса.

Таблица 8.3

Сводные результаты испытаний образцов

Параметры	Номер образца			
	1	2	3	4
Масса (до начала испытания), г	0,33	0,35	0,33	0,32
Масса (после испытания), г	0,48	0,52	0,43	0,44
Разница масс, г	0,15	0,17	0,1	0,12
Капиллярный подъем, мм	72	74	64	66

На основании испытаний можно заключить, что наилучшие результаты показал образец № 2 плотностью 105 г/м² как по разнице масс до и после стирования (0,17 г), так и по капиллярному подъему воды (74 мм).

Таким образом, бумага плотностью 105 г/м² имеет лучшие характеристики поглощения воды и наиболее подходит для производства кассет сотового увлажнения.

По понятным причинам энергетические компании нашей страны не оснащены лабораторным оборудованием для определения капиллярной впитываемости сотовых увлажнителей для ОУ ИТ ГТУ. Однако ТЭЦ, на ПГУ которых уже установлены ОУ ИТ ГТУ, нуждаются в методике проверки предлагаемых кассет сотового увлажнения при проведении тендерных процедур закупки и входного контроля поставляемых изделий. С этой целью была разработана методика тестирования образцов материала сотового увлажнения в условиях энергетических компаний.

В качестве образцов для испытаний были выбраны кассеты, аэродинамические характеристик которых были определены ранее (глава 8.2). В табл. 8.4 приведены названия и технические характеристики образцов кассет.

Таблица 8.4

Конфигурация образцов

Параметр	№ 1 CeLPad-GT	№ 2 CeLPad 0790	№ 3 CeLPad 0760	№ 4 GlasPad 0790	№ 5 GlasPad 0760
Углы укладки листов, град.	45/15	45/45	45/15	45/45	45/15
Высота гофры, мм	5/7	7	7	7	7

Напомним, что образцы, изготовленные из целлюлозы, обозначаются как CeLPad, а из стекловолокна — GlasPad. К примеру, шифр GlasPad 0760 обозначает: материал из стекловолокна, высота гофра 7 мм, суммарный угол расположения слоев бумаги относительно направления входа воздуха 90° ($45^\circ/15^\circ$).

Перед началом испытаний на капиллярную впитываемость из кассет сотового увлажнения вырезались образцы кубической формы размером $100 \times 100 \times 100$ мм. После этого они взвешивались на электронных весах. Внешний вид образцов представлен на *фото 8.33*.

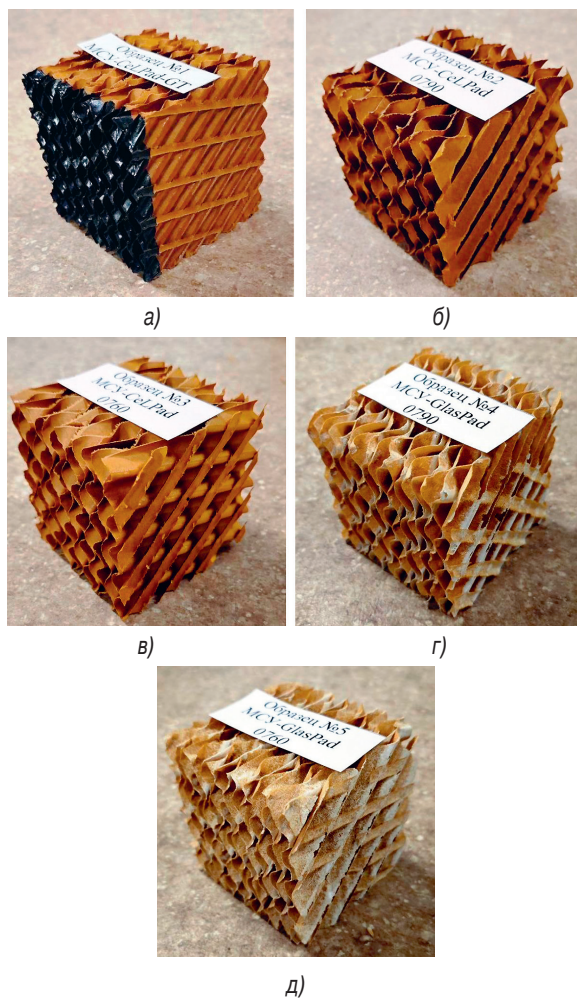


Фото 8.33. Образцы кассет сотового увлажнения из различных материалов:
а) № 1 — CeLPad-GT; б) № 2 — CeLPad 0790; в) № 3 — CeLPad 0760; г) № 4 — GlasPad 0790;
д) № 5 — GlasPad 0760

Сущность методики заключается в определении массы воды в граммах, поглощенной образцом при погружении в емкость с водой при определенных условиях в течение установленного времени, по разности взвешивания до и после погружения. Испытания проводились в закрытом помещении с естественной вентиляцией. Ванночка заполнялась свежей водой так, чтобы испытуемые образцы погружались в воду на 10 мм (фото 8.34) согласно ГОСТ 12602–93 (ISO 8787–86). Через 10 минут образцы вынимались из ванночки и взвешивались на электронных весах.



Фото 8.34. Образцы кассет в процессе тестирования на капиллярную впитываемость:
а) № 4; б) № 3

На фото 8.34б отчетливо виден подъем воды по капиллярам материала CeLPad 0760. В табл. 8.5 представлены результаты взвешивания образцов.

Таблица 8.5

Масса образцов до и после испытания

	№ 1 CeLPad- GT	№ 2 CeLPad 0790	№ 3 CeLPad 0760	№ 4 GlasPad 0790	№ 5 GlasPad 0760
Масса до испытания, г	43,20	26,75	27,44	56,27	51,75
Масса после испытания, г	62,81	41,36	40,58	85,38	87,23
Разница масс, г	19,61	14,61	13,14	29,11	35,48

Выводы

– наилучшие результаты по капиллярной впитываемости показали образцы № 4 GlasPad 0790 и № 5 GlasPad 0760. Оба образца изготовлены из стеклянных волокон с применением диоксида кремния (SiO_2) в виде связующего звена. Средняя разница масс до и после испытаний этих образцов (32,29 г) более

чем в 2 раза превышает среднюю разницу масс целлюлозно-бумажных № 2 и № 3 (15,79 г);

– среди образцов, изготовленных из целлюлозно-бумажных листов, наилучшие результаты показал № 1 CelPad-GT. Разница массы до и после испытания этого образца (19,61 г) превышает среднюю разницу масс целлюлозно-бумажных образцов № 2 и № 3 (13,875 г) более чем на 40%;

– отечественные ТЭЦ с ОУ ИТ ГТУ получили быстрый и малозатратный экспресс-метод сравнения капиллярной впитываемости нескольких образцов кассет, изготовленных из различных материалов.

8.4. Стойкость материала кассет к внешним климатическим воздействиям и огню

Межгосударственный стандарт ГОСТ 15150–69 «Машины, приборы и другие технические изделия» регламентирует исполнение для различных климатических районов, категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды [11]. Технические изделия должны сохранять свои параметры в пределах норм, установленных техническими заданиями, стандартами или техническими условиями в течение сроков службы и сроков сохраняемости, указанных в технических заданиях, стандартах или технических условиях, после и (или) в процессе воздействия климатических факторов, значения которых установлены этим стандартом.

С целью определения условий транспортировки и хранения кассет ОУ ИТ в различных макроклиматических районах РФ, образцы МСУ различных производителей были подвергнуты воздействию низких и высоких температур, а также высокой влажности.

В качестве объектов тестирования были выбраны образцы МСУ из различного материала для кассет ОУ ИТ, которым были присвоены индивидуальные номера: CelPad-GT 5760 — № 1, CelPad 0790 — № 2, CelPad 0760 — № 3, GlasPad 0790 — № 4, GlasPad 0760 — № 5; DRI (Индия) — № 6. Внешний вид образцов представлен на *фото 8.35*, массогабаритные параметры — в *табл. 8.6*.

Таблица 8.6

Масса и габаритные размеры образцов МСУ

Образец	1	2	3	4	5	6
Размеры, мм	100×100×100					
Масса, г	42,02	25,81	27,10	61,33	52,20	42,81

Стойкость образцов к воздействию температуры определялась по межгосударственному стандарту ГОСТ 30630.2.1–2013 «Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин,

приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры» [12].

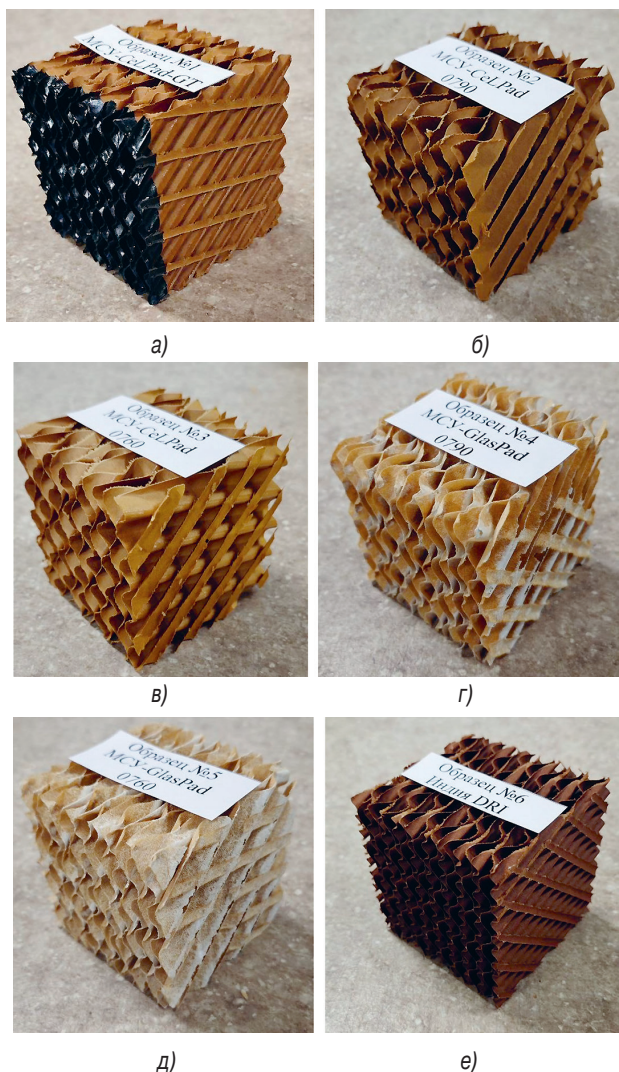


Фото 8.35. Образцы МСУ для кассет ОУ ИТ: а) № 1; б) № 2; в) № 3; г) № 4; д) № 5; е) № 6

Первоначально образцы были тестированы на воздействие нижнего значения температуры воздуха при транспортировке и хранении, а затем на воздействие верхнего значения.

Испытания проводились в лабораторном помещении лаборатории ООО «Фильтрационные Технологии» в климатической камере BST-TH-408D (фото 8.36а). В обоих случаях образцы МСУ подвергались внешнему осмотру на предмет целостности, затем устанавливались на полку камеры (фото 8.36б). Далее камера герметично закрывалась, и согласно ГОСТ 15150–69 устанавливались минимальные и максимальные значения температуры. В первом случае это $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (фото 8.37а). При достижении камерой установленной температуры запускался таймер на выдержку не менее 5 часов. По истечении заданного времени образцы приводились к нормальным условиям, после чего проводился внешний осмотр и тактильный контроль для оценки их состояния. По результатам контроля было сделано заключение о целостности образцов.

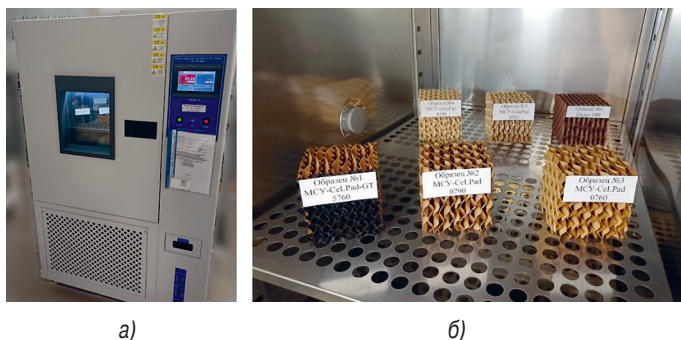


Фото 8.36. Испытание образцов на воздействие нижнего значения температуры воздуха:
а) климатическая камера BST-TH-408D; б) МСУ № 1–6 в климатической камере

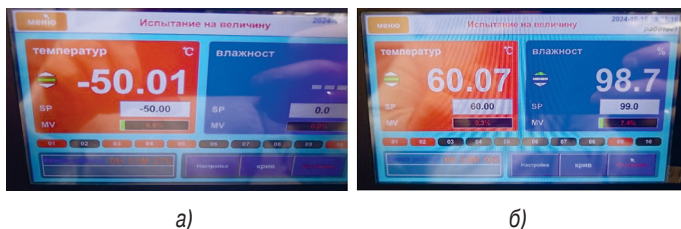


Фото 8.37. Температура и влажность при испытаниях образцов в климатической камере:
а) нижнее значение; б) верхнее значение

При испытаниях на воздействие верхнего значения температуры воздуха устанавливался режим $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и влажность 98% (фото 8.37б). При достижении камерой установленной температуры и влажности, запускался таймер на выдержку не менее 5 часов (фото 8.38а). По истечении заданного времени образцы приводились к нормальным условиям (фото 8.38б), затем проводился внешний осмотр и тактильный контроль для оценки их состояния, после чего образцы взвешивались (табл. 8.7).

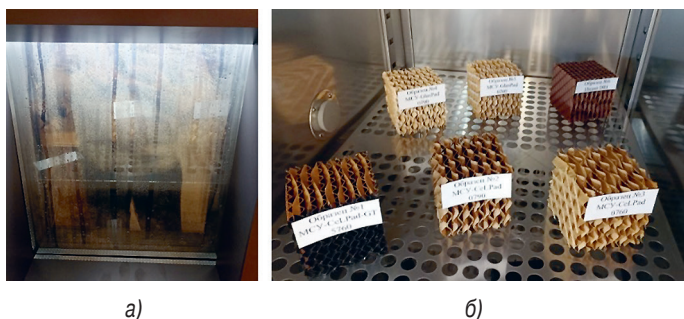


Фото 8.38. Образцы МСУ в климатической камере при температуре $+60^{\circ}\text{C}$ и влажности 98%: а) в процессе тестирования; б) после окончания теста

Таблица 8.7

Масса образцов МСУ до и после воздействия повышенной влажности

Образец	1	2	3	4	5	6
Масса до испытаний, г	42,02	25,81	27,10	61,33	52,20	42,81
Масса после испытаний, г	44,47	27,04	28,25	80,08	71,50	50,64

Наибольшее изменение веса МСУ после испытаний зафиксировано у образцов № 4 (GlasPad 0790) и № 5 (GlasPad 0760). Это обусловлено тем, что в состав этих МСУ помимо стекловолокна входит аморфный силикагель, обладающий высокой гигроскопичностью.

Внешний осмотр и тактильный контроль состояния всех образцов после испытаний показал, что воздействие высокой температуры $+60^{\circ}\text{C}$ и повышенной влажности 98% не повлияло на механические свойства образцов. Отслоений в местах склейки (соединений) материала и охрупчивания материалов не обнаружено.

По результатам проведенных испытаний по ГОСТ 30630.2.1–2013 на стойкость к внешним климатическим воздействующим факторам можно сделать следующие выводы:

- допускается транспортировка и хранение материалов сотового увлажнителя в температурном диапазоне $-50...+60^{\circ}\text{C}$, при влажности $0...98\%$;
- материалы сотовых увлажнителей соответствуют условиям хранения и транспортирования по ГОСТ 15150–69, группа 6 (ОЖ2) «Машины, приборы и другие технические изделия».

Для соблюдения требований пожарной безопасности испытания на горючесть МСУ проводились в закрытом помещении, имеющем естественную вентиляцию и оборудованном средствами пожаротушения. В качестве образцов были выбраны материалы, аналогичные образцам CeLPad-GT, CeLPad 0790, CeLPad 0760, GlasPad 0790 и GlasPad 0760, которые были подвергнуты климатическим испытаниям. МСУ получили такие же индивидуальные номера. Образцы размещались на металлическом поддоне, где поджигались с помощью газовой горелки. Фиксация процесса горения (тления) МСУ

и времени воздействия пламени на образцы осуществлялась с помощью фото- и видеоаппаратуры.

На *фото 8.39* изображен МСУ CeLPad-GT перед испытаниями, во время процесса горения и после его окончания.

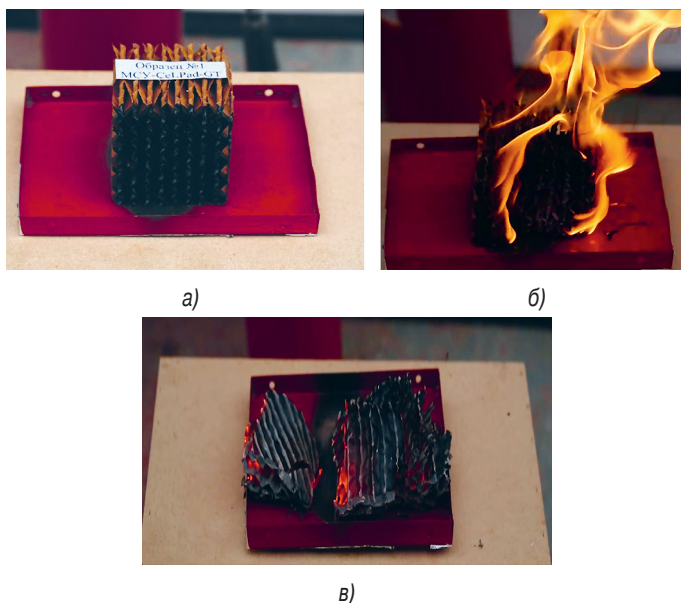


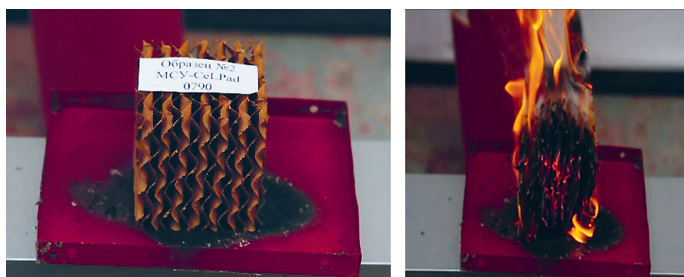
Фото 8.39. Образец № 1 CeLPad-GT:

а) перед испытанием; б) во время; в) после испытания на горючесть

Материал CeLPad-GT горюч, даже в отсутствие первоначального воздействия открытого огня происходит его горение и тление до полного разрушения. Время воздействия пламени на образец № 1 составило 3 с. Время горения до затухания — 105 с. Суммарное время горения и тления до полного разрушения — 129 секунд.

Материал CeLPad 0790 также горюч. В отсутствие первоначального воздействия открытого огня происходит горение и тление материала до полного разрушения. Время воздействия пламени на образец № 2 составило 3 с. Время горения до затухания — 60 с. Суммарное время горения и тления до полного разрушения — 72 секунды. На *фото 8.40* показан образец CeLPad 0790 перед испытанием, во время и после испытания.

Аналогично на *фото 8.41* показан образец № 3 CeLPad 0760. Его материал горюч, в отсутствие воздействия огня происходит горение и тление до полного разрушения. Время воздействия пламени составило 3 с. Время горения до затухания — 66 с. Суммарное время горения и тления до полного разрушения — 82 секунды.



а)

б)



в)

Фото 8.40. Образец № 2 CeLPad 0790:
а) перед испытанием; б) во время; в) после испытания на горючесть



а)

б)



в)

Фото 8.41. Образец № 3 CeLPad 0760:
а) перед испытанием; б) во время; в) после испытания на горючесть

Испытания на горючесть образца № 4 GlasPad 0790 (фото 8.42) показали, что материал не подвержен горению. Пламя воздействовало в течение 20 секунд.

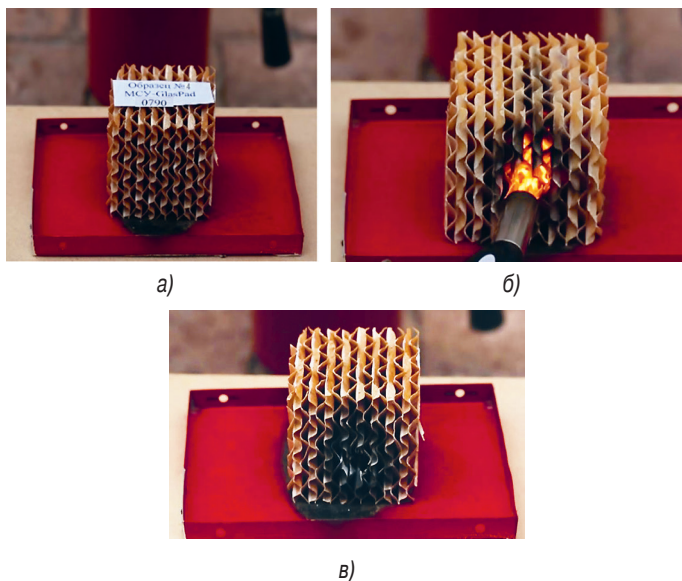


Фото 8.42. Образец № 4 GlasPad 0790:

а) перед испытанием; б) во время; в) после испытания на горючесть

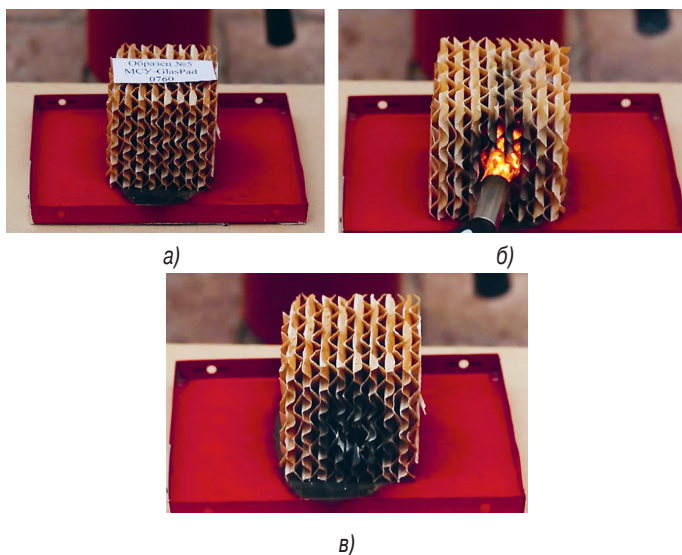


Фото 8.43. Образец № 5 GlasPad 0760:

а) перед испытанием; б) во время; в) после испытания на горючесть

Материал образца № 5 GlasPad 0760, как и аналогичный материал образца № 4 из стекловолокна, не горюч (*фото 8.43*). Время воздействия пламени на образец 20 секунд.

По результатам проведенных испытаний на стойкость материала кассет к воздействию открытого огня можно сделать следующие **выводы**:

- материалы CeLPad-GT, CeLPad 0790 и CeLPad 0760, изготовленные из целлюлозы, горят при воздействии открытого огня. В отсутствие пламени горение и тление продолжается до полного разрушения;

- время горения и тления материала CeLPad-GT больше, чем у других образцов, изготовленных из целлюлозы. Это объясняется тем, что его края, в отличие от двух других образцов, обработаны защитным слоем;

- стекловолоконные материалы GlasPad 0790 и GlasPad 0760 не горючи. Кассеты из стекловолокна используются в тех случаях, когда к оборудованию предъявляются строгие требования по пожарной безопасности.

8.5. Защита кассет ОУ ИТ энергетических ГТУ от плодов цветения растений и двукрылых насекомых

Многолетний опыт эксплуатации ОУ ИТ ГТУ на блоках ПГУ ТЭЦ в весенне-летний период показал, что материал кассет подвержен интенсивному загрязнению плодами цветения растений и двукрылыми насекомыми. Это происходит несмотря на заявления иностранных производителей, что их кассеты являются самоочищающимися под воздействием подаваемой воды. В результате загрязнения материала кассет растет перепад давления на ОУ ИТ, что негативно сказывается на выработке электроэнергии.

Загрязнение кассет происходит не только там, где отсутствуют противомоскитные сетки, но и при наличии такой защиты [13, 14]. Повреждение противомоскитных сеток и (или) их смещение со штатных мест установки под воздействием внешних факторов во время эксплуатации являются дополнительными причинами загрязнения материала кассет (*фото 8.44*).

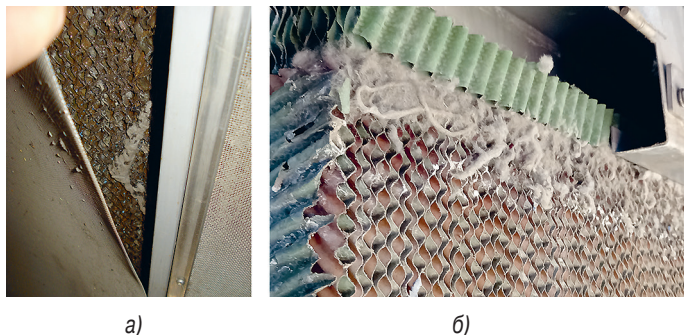


Фото 8.44. Загрязнение поверхности кассет ОУ ИТ энергетических ГТУ тополиным пухом в результате: а) повреждения; б) смещения противомоскитной сетки

Опыт дефектации кассет после окончания весенне-летнего периода эксплуатации показал, что загрязнения пылью, плодами цветения растений, насекомыми глубоко проникают в проходные сечения между гофрами материала кассет, тем самым дросселируя каналы подвода воздуха (фото 8.45). В итоге нарушается процесс теплообмена горячего воздуха окружающей среды и холодной цикловой воды ОУ ИТ ГТУ.

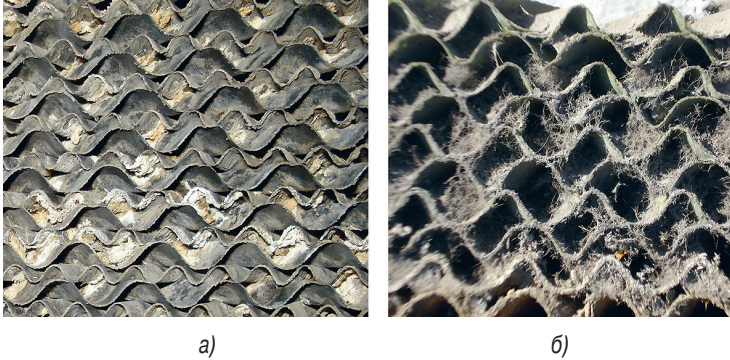


Фото 8.45. Загрязнение гофр материала кассет ОУ ИТ энергетической ГТУ: а) плодами цветения растений; б) тополиным пухом

В результате загрязнения ежегодно увеличивается масса кассет и растет сопротивление ОУ ИТ на входе ГТУ (см. рис. 7.6 и 7.8). Кроме того, отложения различных природных загрязнителей на поверхности кассет приводят к нарушению насыщения (капиллярной впитываемости) их материала водой. В результате снижается испарительная способность материала кассет и эффективность охлаждения циклового воздуха ГТУ. Следовательно, загрязнение материала кассет ведет к комплексному негативному воздействию на эффективность работы энергетической ГТУ в условиях высоких температур наружного воздуха.

Вывод из сложившейся ситуации напрашивается сам собой: существующая штатная система защиты фильтров КВОУ с помощью сеток от птиц и мусора, а также противомоскитных сеток, установленная перед ОУ ИТ ГТУ, недостаточна для обеспечения эффективной работы испарительных кассет в весенне-летний период эксплуатации.

Таким образом, обозначилась техническая задача разработки дополнительной защиты кассет ОУ ИТ от тополиного пуха, двукрылых насекомых, плодов цветения растений. К этому устройству предъявляются следующие требования: оно должно обладать максимальной эффективностью улавливания сезонных загрязнений и при этом иметь небольшой начальный перепад давления для минимизации негативного влияния на работу энергетической ГТУ. Другим требованием является простота обслуживания и возможность

регенерации в процессе эксплуатации. Кроме того, оно должно иметь небольшую стоимость и доступность для приобретения на отечественном рынке.

Материалом, удовлетворяющим всем изложенным требованиям, для таких защитных устройств является ретикулированный пенополиуретан. Он обладает различной пористостью и конфигурацией. Вариатор различных конфигураций используется для изготовления униформы структуры открытых ячеек пены с контролируемым размером пор между PPI 10 и PPI 80 (PPI — PoresperInch — количество пор на одном дюйме). Конфигурация PPI может быть как плоской, так и Z-образной. Зигзагообразный вспененный полиуретан применяется для увеличения площади фильтрации материала.

Для определения оптимального начального перепада давления материала были выбраны следующие образцы PPI [15]:

- № 1 PPI 10, S10 мм (плоский);
- № 2 PPI 10, S20 мм (плоский);
- № 4 PPI 20, S10 мм (плоский);
- № 5 PPI 20, S20 мм (плоский);
- № 7 PPI 10, S10 мм (Z-образный);
- № 8 PPI 10, S20 мм (Z-образный);
- № 9 PPI 20, S10 мм (Z-образный);
- № 10 PPI 20, S20 мм (Z-образный).

Для исключения возможности протечек воздуха через неплотности образцов PPI они были заключены в корпуса из нержавеющей стали. Массогабаритные показатели образцов были определены с помощью мерительных инструментов и электронных весов. Результаты замеров представлены на *фото 8.46, 8.47* и в *табл 8.8*.

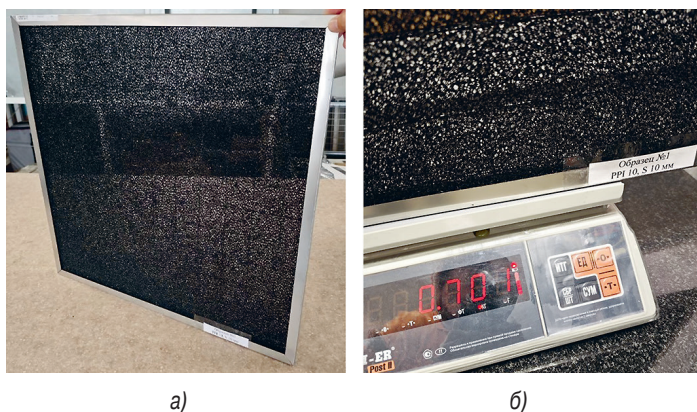


Фото 8.46. Образец № 1 PPI: а) внешний вид; б) взвешивание



а)

б)

Фото 8.47. Образец № 7 PPI: а) внешний вид; б) взвешивание

Таблица 8.8

Массогабаритные показатели образцов

Образец	Ширина, мм	Высота, мм	Глубина, мм	Масса, г
1	600	600	15	701
2			25	861
4			15	701
5			25	855
7			35	905
8			45	1095
9			35	905
10			45	1062

Перепад давления на образцах определялся на аэродинамическом стенде (фото 8.48).

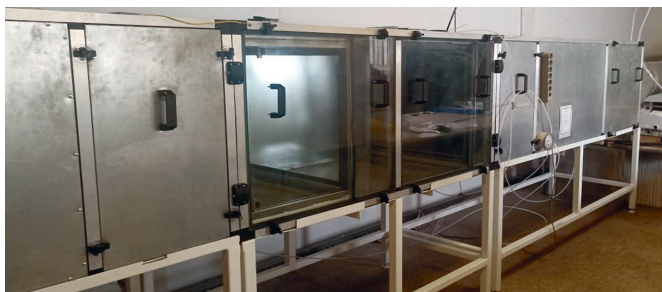


Фото 8.48. Аэродинамический стенд

На фото 8.49 показаны образцы, установленные на аэродинамическом стенде.

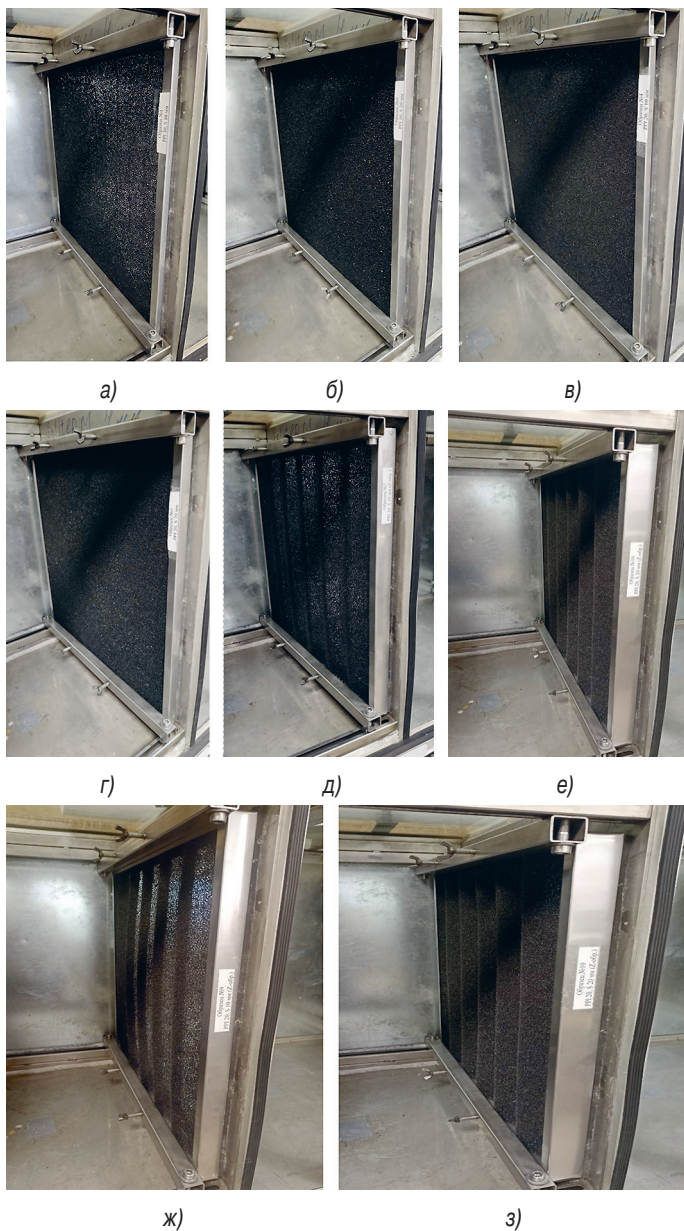


Фото 8.49. Образцы на стенде при проведении испытаний: а) № 1; б) № 2; в) № 4; г) № 5; д) № 7; е) № 8; ж) № 9; з) № 10

На рис. 8.50 представлены результаты определения перепада давления.

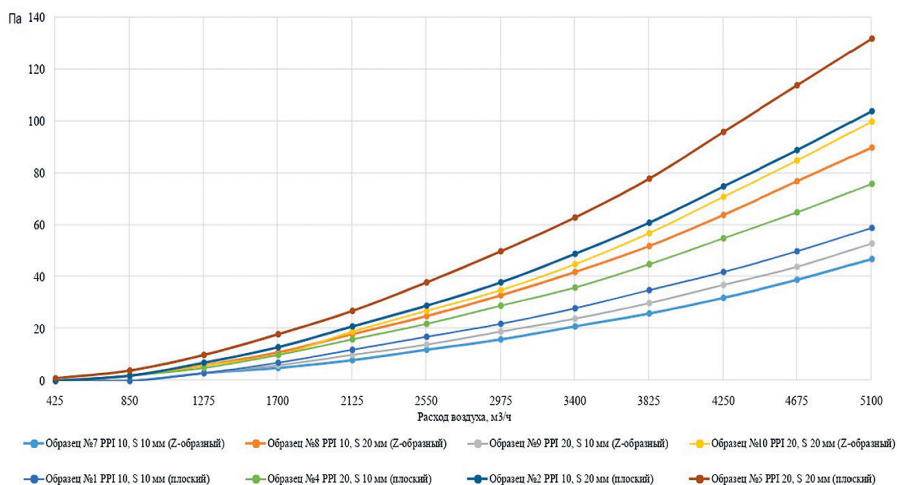


Рис. 8.50. График перепада давления на образцах

По результатам аэродинамических испытаний восьми образцов ретикулированного пенополиуретана различной толщины, пористости и конфигурации установлено, что оптимальным по начальному перепаду давления является материал PPI 10, S10 мм с Z-образной геометрией, соответствующий классу очистки G2 по ГОСТ Р 779–2014.

Эффективность защиты кассет ОУ ИТ ГТУ от тополиного пуха определялась с помощью его имитатора — сверхтонкого полиэфирного силиконизированного микроволокна в количестве 50 г (фото 8.51).



Фото 8.51. Взвешивание имитатора тополиного пуха

Силиконизированное микроволокно («искусственный пух») состоит из полых полиэфирных нитей, в которых много воздушных полостей. Благодаря этой структуре, он обладает минимальным весом, водостойкостью и хорошими теплоизоляционными показателями, так как воздух, находящийся между волокнами, является отличным теплоизолятором. Для придания прочности нити покрывают силиконом. Замеренная плотность использованного в тестировании количества «искусственного пуха», отнесенная к объему камеры смешения испытательного стенда, составила $0,78 \text{ кг/м}^3$.

Минимальная плотность непрямтого «ковра» из тополиного пуха составляет $(0,6 \pm 0,1) \text{ кг/м}^3$ и определяется степенью распушения волокнистого материала в сочетании с естественными зазорами между соседними пушинками при формировании слоя путем свободного падения отдельных пушинок под действием гравитации. Плотность может быть увеличена в широком диапазоне при необратимом уплотнении волокон. На верхней границе непрямтого «ковра» (высота равна $h=0$) плотность пуха минимальна. На нижней границе ($h=H$) она максимальна и будет расти с увеличением высоты «ковра». В частности, уже при $H=0,04 \text{ м}$ относительное различие плотности пуха по высоте достигнет 15% [16].

Сравнивая данные по плотности «ковра» тополиного пуха, представленные в этой работе, и результаты расчета плотности «искусственного пуха» при эквивалентных испытаниях в лабораторных условиях, приходим к выводу, что «искусственный пух» идентичен природному не только по структуре волокон, но и по плотности. Ниже приведена методика испытаний защиты кассет ОУ ИТ энергетических ГТУ на базе сверхтонкого полиэфирного силиконизированного микроволокна от тополиного пуха.

Испытание производилось в течение 180 секунд, в течение которых имитатор тополиного пуха полностью перемещался на испытуемый образец. Перед и после тестирования образец материала PPI 10 S10 взвешивался (фото 8.52).

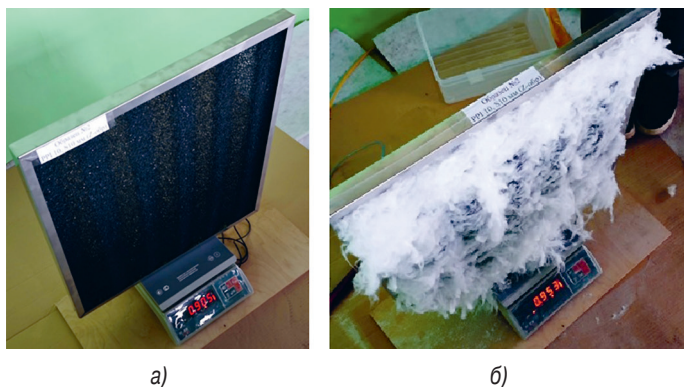


Фото 8.52. Образец PPI 10, S10: а) до; б) после испытаний

Таблица 8.9

Результаты взвешивания образца № 7

	PPI 10, S10 (Z-обр)
Масса до испытания, г	905
Масса после испытания, г	953*

* 2 грамма имитатора тополиного пуха не долетели до образца и были обнаружены в канале стенда

Таким образом, образец № 7 PPI 10, S10 (Z-обр) обладающий минимальным перепадом давления, показал 100%-ную эффективность, задержав всю массу имитатора тополиного пуха.

На основании результатов исследований была разработана система крепления защиты кассет ОУ ИТ энергетических ГТУ от тополиного пуха на базе ретикулированного пенополиуретана. Материал крепится на подложке из нержавеющей стали, повторяющей Z-форму матов защиты. Для надежного размещения материала PPI 10, S10 (Z-обр) на подложке по ее периметру предусмотрены металлические фиксаторы (рис. 8.53а). Такая система крепления исключает проникновение продуктов цветения растений и двукрылых насекомых с воздушным потоком на кассеты (рис. 8.53б). Материал PPI 10, S10 (Z-обр) может быть подвержен регенерации (очистке) в процессе эксплуатации несколько раз. На фото 8.54 показана спроектированная и изготовленная система защиты кассет ОУ ИТ ГТУ от тополиного пуха на базе ретикулированного пенополиуретана, установленная на ТЭЦ ПАО «Мосэнерго».

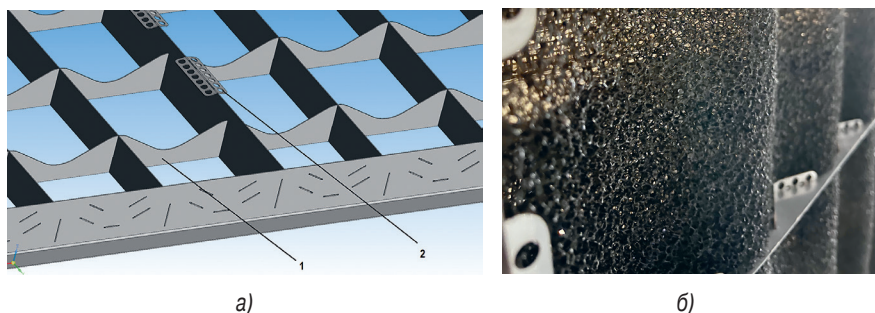


Рис. 8.53. Защита кассет ОУ ИТ ГТУ от тополиного пуха: а) подложка: 1 — элемент подложки; 2 — фиксаторы; б) материал PPI 10, S10 (Z-обр) на подложке

На фото 8.54а зафиксирован занос защиты кассет тополиным пухом, а на фото 8.54б показано совершенно чистое состояние защиты с внутренней стороны.

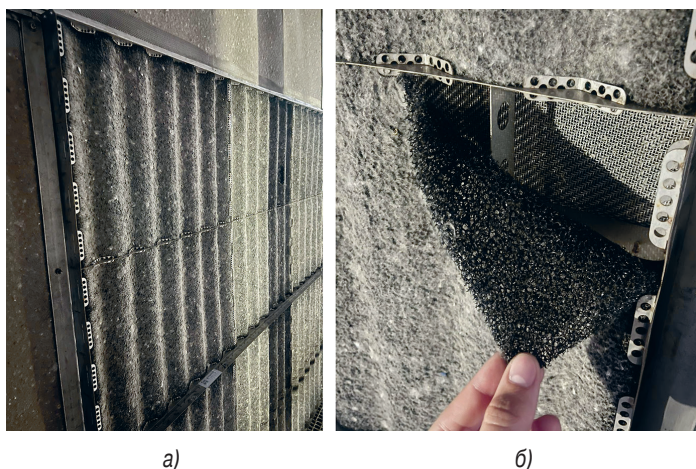


Рис. 8.54. Защита от тополиного пуха на ОУ ИТ ГТУ:
а — занос тополиным пухом; б — чистая обратная сторона защиты

В процессе эксплуатации система защиты от плодов цветения растений и двукрылых насекомых, установленная перед ОУ ИТ ГТУ на ТЭЦ-3, подтвердила свою высокую эффективность, определенную во время эквивалентных испытаний в лабораторных условиях, и простоту обслуживания.

Выводы:

– защита кассет ОУ ИТ ГТУ от двукрылых насекомых и плодов цветения растений на базе ретикулированного пенополиуретана обладает следующими преимуществами: максимальной эффективностью в улавливании сезонных загрязнений при небольшом начальном перепаде давления, простотой обслуживания и возможностью регенерации в процессе эксплуатации, небольшой стоимостью и доступностью на отечественном рынке;

– ретикулированный пенополиуретан предотвращает загрязнения не только от двукрылых насекомых и плодов цветения растений, но и от различного мусора, поднимаемого ветром и проникающего через клетки защитной сетки от птиц и мусора КБОУ ГТУ;

– предложена методика эквивалентных испытаний воздушных фильтров различного класса для определения эффективности очистки от тополиного пуха с помощью его имитатора.

8.6. Защита кассет ОУ ИТ ГТУ от механических повреждений с целью повышения их срока службы и эффективности увлажнения циклового воздуха ГТУ

Опыт эксплуатации ОУ ИТ ГТУ на отечественных ТЭЦ показал, что испарительные кассеты из-за хрупкости их материала (целлюлоза) подвержены механическим повреждениям и загрязнению плодами цветения растений, двукрылыми насекомыми и пылью. В процессе дефектации испарительных кассет, проводимых при выводе ОУ ИТ ТЭЦ из эксплуатации на время осенне-зимнего периода (ОЗП), определялись подлежащие замене изделия при наличии следующих видов повреждений:

- замятие углов, граней кассет (*фото 8.55а*);
- повреждение сопрягаемой поверхности кассет (*фото 8.55б*), приводящее к появлению зазора между кассетами (*фото 8.55в*).
- занос фронтальной поверхности отложениями тополиного пуха и пыли (*фото 8.55г*).

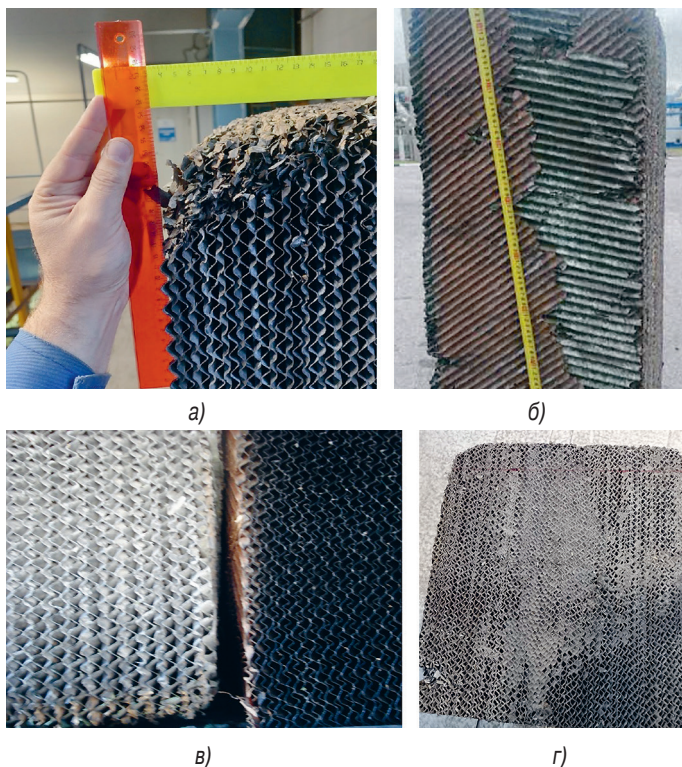


Фото 8.55. Виды повреждений кассет ОУ ИТ: а) замятие углов; б) повреждение сопрягаемой поверхности; в) зазор между кассетами; г) занос поверхности загрязнениями

В табл. 8.10 в процентном отношении представлены количественные результаты дефектации двух типоразмеров испарительных кассет с различных ТЭЦ в зависимости от срока их эксплуатации.

Таблица 8.10

Результаты дефектации кассет ОУ ИТ ГТУ по срокам эксплуатации (%)

ТЭЦ	1500×600×300 мм	1360×600×300 мм	Срок (сезон)
1	27,3	25,5	2
2	45,4	48,1	3
3	64,9	67,5	4

Из приведенных в табл. 8.10 данных видно, что уже через три года эксплуатации практически половина кассет выходит из строя и подлежит замене. По информации ТЭЦ, использующей ОУ ИТ ГТУ более 10 лет и демонтирующей кассеты на время ОЗП, средний срок их службы составляет 3 года (сезона эксплуатации).

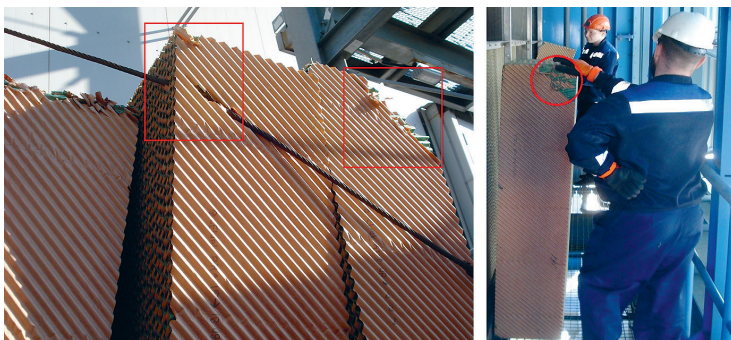
Занос тополиным пухом энергетического оборудования свойственен только тем крупным промышленным регионам нашей страны, таким как Москва и Санкт-Петербург, где имеет место плотная засадка тополей. Например, для Краснодарской ТЭЦ такие проблемы не свойственны, поскольку город в основном засажен платанами, липами и кленами.

Для снижения количества отбракованных при дефектации загрязненных испарительных кассет было разработано и внедрено техническое решение, позволяющее полностью предотвратить их занос тополиным пухом и двукрылыми насекомыми на ОУ ИТ ГТУ в Москве (см. главу 8.5).

Исключение механических повреждений кассет ОУ ИТ является непростой технической задачей из-за неизбежного тактильного контакта монтажников с хрупким материалом изделий, изготовленных из целлюлозы. В результате повреждений кассет уменьшаются их габаритные размеры, а следовательно, площадь теплообмена, в итоге снижается эффективность охлаждения циклового воздуха ГТУ в ОУ ИТ.

Кроме того, изменение оптимальных (расчетных) размеров кассет может приводить к их смещению относительно других изделий и даже выпадению со штатных мест.

Опыт эксплуатации показывает, что основная часть дефектов получена кассетами в процессе их монтажа-демонтажа. Механические повреждения материала кассет происходят в основном при поднятии кассет на КВОУ стропами подъемного устройства и при снятии/установке в ОУ ИТ руками монтажников (фото 8.56).



а)

б)

Фото 8.56. Механические повреждения кассет ОУ ИТ:
а) стропами грузовой лебедки; б) руками монтажников

Отмечены случаи, когда в процессе монтажа подрядными организациями повреждалось порядка 40–42% новых кассет. Возникает вопрос: как избежать или минимизировать механические дефекты и экономические потери, вызванные повреждениями?

На ряде ОУ ИТ в Башкирии, Москве и в Краснодарском крае установка/снятие кассет проводится дважды в год, что увеличивает вероятность появления новых дефектов. В то время как на Невинномысской ГРЭС в Ставропольском крае и на Новогорьковской ТЭЦ в Нижегородской области кассеты на осенне-зимний период не снимают, что резко снижает риски повреждения хрупкого их материала.

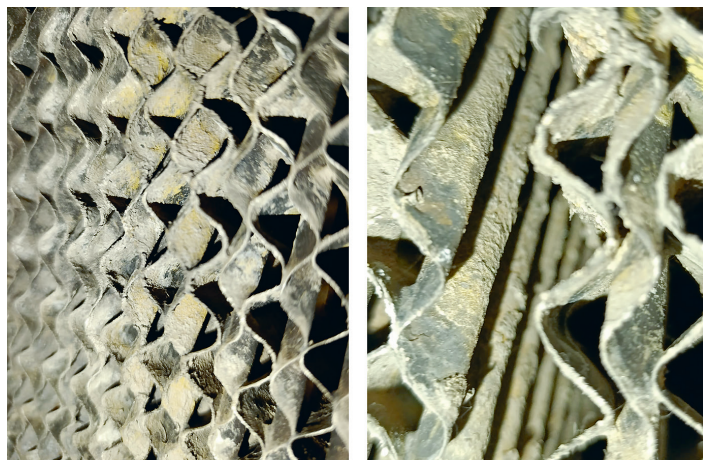
Какие же соображения влияют на принятие решения о снятии кассет ОУ ИТ или оставлении на время ОЗП?

Прежде всего это климатические условия. При низких температурах атмосферного воздуха и обильных природных осадках в ОЗП существуют высокие риски заноса кассет снегом и повреждения их при знакопеременных температурах. Кроме того, блокирование кассет снегом может привести к резкому повышению перепада давления на всасе ГТУ и, как следствие, снижению выработки мощности и электроэнергии. Этот аргумент наглядно иллюстрирует технические решения, принятые для ОУ ИТ ГТУ Затонской ТЭЦ и ТЭЦ в Москве. А как с учетом климатических условий объяснить принятие противоположных технических решений — снимать кассеты на Краснодарской ТЭЦ и не снимать на Невинномысской ГРЭС? В обоих местах климатические условия схожие. В Невинномыске климат умеренно континентальный, для него характерны мягкая зима и жаркое лето. Зимой температура воздуха в среднем 3 °С: ночью опускается до –11 °С, а днем поднимается до +11 °С.

Климат Краснодара — переходный от умеренно-континентального к субтропическому. Весь год преобладают воздушные массы умеренных широт,

в летний период зачастую поступает тропический воздух. Среднемесячные температуры зимы колеблются от $+7^{\circ}$ до -5° . Зимой осадки выпадают обычно в виде дождя, редко — снега [17].

В этом случае аргументом принятия решения являются конструктивные особенности ОУ ИТ и КВОУ ГТУ. Если на Краснодарской ТЭЦ ОУ ИТ традиционно расположена перед КВОУ ГТУ, то на Невинномысской ГРЭС внутри КВОУ (между влагоотделителями и фильтрами грубой очистки). Таким образом, кассеты ОУ ИТ Невинномысской ГРЭС защищены от воздействия внешней среды влагоотделителями и противообледенительной системой, предотвращающей обмерзание воздушных фильтров. Позиция Краснодарской ТЭЦ по этому вопросу диаметрально противоположная. Оставление кассет и каплеуловителей на время ОЗП приведет к их интенсивному загрязнению, росту перепада давления в течение более длительного времени по сравнению с весенне-летним периодом эксплуатации ГТУ и неоправданным потерям мощности и выработки электроэнергии. На *фото 8.57* показано состояние материала кассет ОУ ИТ ГТУ после 5 лет эксплуатации без снятия на ОЗП.



а)

б)

Фото 8.57. Состояние материала кассет ОУ ИТ ГТУ без снятия на ОЗП:

а) фронтальный вид; б) локальный вид

Повторное, после ОЗП, применение использованных кассет в ОУ ИТ ГТУ без учета ранее выбранного для установки места ведет к неплотному прижиманию сопрягаемых поверхностей. В образовавшиеся между кассетами щели на всас ГТУ поступает горячий воздух, который не успевает охладиться цикловой водой ОУ ИТ, что приводит к снижению выработки мощности блока ПГУ при высоких температурах окружающей среды. В ряде случаев такие щели устраняются проставками, нарезанными из материала поврежденных

кассет, однако это не обеспечивает в полной мере необходимую герметичность соединения рядом стоящих кассет и не является надежным.

Для предотвращения таких ситуаций существует простое организационно-техническое решение, заключающееся в нумерации новых кассет по ярусам и всасам КВОУ перед их установкой на ОУ ИТ ГТУ (рис. 8.58). В этом случае при очередной установке кассет их не надо подгонять друг к другу и устанавливать дополнительные клинья или проставки из аналогичного материала.



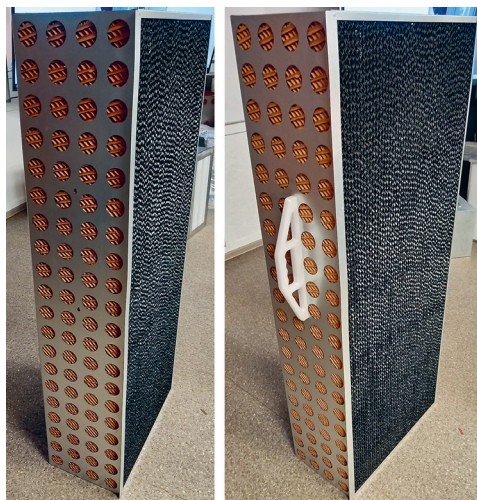
Рис. 8.58. Нумерация кассет перед их установкой в ОУ ИТ ГТУ

К сожалению, даже при очень бережном отношении к материалу кассет в процессе работы с ними возникают дефекты, отрицательно влияющие на срок службы кассет и эффективность эксплуатации ОУ ИТ.

Решение этой задачи предусматривает кардинальное исключение любого тактильного контакта персонала с хрупким материалом кассет. Для этого необходимо было разработать такое устройство, которое обладало бы следующими свойствами:

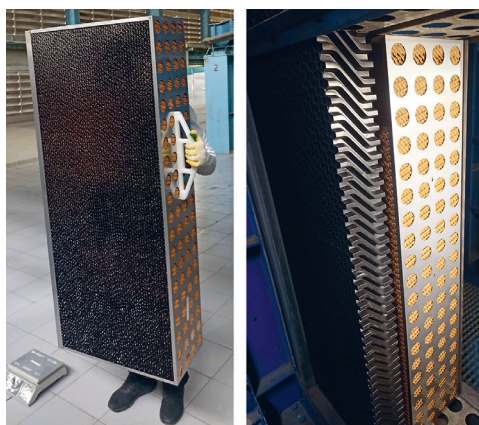
- надежно защищало материал кассет от механических воздействий;
- обеспечивало бесперебойный доступ цикловой воды и атмосферного воздуха на материал кассет;
- материал защиты должен быть коррозионно стойким к воздействию цикловой воды ОУ ИТ, устойчив к внешним и механическим воздействиям при нормальной эксплуатации;
- масса защиты кассет должна позволять без затруднений и дополнительных усилий снятие/установку на ОУ ИТ;
- защита кассет должна быть оснащена приспособлениями, позволяющими беспрепятственно осуществлять снятие/установку кассет в ОУ ИТ без тактильного контакта с материалом.

Реализация требований к защите кассет ОУ ИТ ГТУ от механических повреждений нашла свое исполнение в следующем техническом решении [18]: создать защиту (оболочку) из нержавеющей стали, закрывающую боковые стороны материала кассет, металлические боковины оболочки выполнить из



а) б)

Фото 8.59. Защита кассет ОУ ИТ ГТУ: а) кассета с защитой от механических повреждений; б) использование ручки для подъема/снятия кассет в защитной оболочке



а) б)

Фото 8.60. Кассеты в защитной оболочке из нержавеющей стали на ТЭЦ: а) в процессе установки на ОУ ИТ ГТУ; б) в ОУ ИТ ГТУ перед каплеуловителем

перфорированной стали для снижения массы защиты, для предотвращения тактильного контакта монтажника с материалом кассеты во время их снятия/установки на ОУ ИТ ГТУ предусмотреть пластмассовые ручки, вставляющиеся в пазы защиты с боковых сторон.

На фото 8.59 представлена изготовленная ООО «Фильтрационные Технологии» для ПАО «Мосэнерго» кассета в защитной оболочке из нержавеющей стали и способ крепления пластмассовых ручек для поднятия/снятия кассеты с ОУ ИТ ГТУ.

Партия кассет с защитной оболочкой из нержавеющей стали прошла натурные испытания на ОУ ИТ ТЭЦ-3 в течение всего весенне-летнего сезона эксплуатации ГТУ (фото 8.60).

Кассеты поставляются на ТЭЦ уже в металлической оболочке, что исключает тактильный контакт персонала с хрупким материалом и значительно сокращает время монтажа в условиях эксплуатации блока ПГУ. При установке в ОУ ИТ обеспечивается плотное прилегание сопрягаемых поверхностей оболочек кассет и исключается появление щелей между ними, что положительно сказывается на процессе охлаждения циклового воздуха ГТУ. Кроме того, полностью исключается повреждаемость материала кассет, приводящая к изменению габаритных размеров, а следовательно, к уменьшению площади испарения. Другими словами, повышается

вероятность безотказной работы материала кассет, заключенных в защитную оболочку, и увеличивается его срок службы (наработка на отказ) до 5–7 лет.

После окончания весенне-летнего периода эксплуатации несколько оболочек кассет были вскрыты для визуального и инструментального контроля состояния материала (*фото 8.61*).

Оболочки материала испарительных кассет не были подвержены коррозионному воздействию цикловой водой. Механических повреждений материала в процессе осмотра не зафиксировано.

Выводы:

- решение по снятию испарительных кассет или оставлению их на объекте в ОЗП принимается на ТЭЦ исходя из климатических условий эксплуатации ГТУ, конструктивных особенностей расположения элементов КВОУ и ОУ ИТ, экономической целесообразности;

- для снижения повреждаемости материала испарительных кассет, не имеющих специальной защиты от механических повреждений, целесообразно перед установкой на ОУ ИТ пронумеровать их по всасам и ярусам КВОУ ГТУ;

- защита материала испарительных кассет, изготовленных из целлюлозы, оболочками из нержавеющей стали с пластмассовыми ручками показала свою высокую надежность и эффективность. Это позволило полностью исключить первопричину механических повреждения материала кассет — тактильный контакт;

- срок службы материала кассет в металлической оболочке может достигать 5–7 лет при надлежащей защите от загрязнений двукрылыми насекомыми, плодами цветения растений и пылью.



Фото 8.61. Проверка состояния материала кассет после окончания эксплуатации в ОУ ИТ ГТУ

8.7. Импортозамещение ремонтного комплекта ОУ ИТ энергетических ГТУ

Как отмечалось ранее, отечественные энергетические компании, использующие зарубежные охладительные установки испарительного типа, столкнулись с проблемами импортозамещения запасных частей ремонтного комплекта [19]. Основным поставщиком являлась шведская компания Munters, которая с началом СВО прекратила поставки своей продукции в нашу страну.

Принцип работы ОУ ИТ этого производителя представлен на 3D-модели (рис. 8.62а). Из емкости с поплавковым клапаном цикловая вода электронасосом подается в раздаточный коллектор, где через отверстия в трубопроводе поступает на материал сотового увлажнения (МСУ). Одна часть цикловой воды впитывается МСУ и в дальнейшем испаряется, охлаждая воздух на входе ГТУ. Другая направляется в дренажную систему устройства и на каплеуловители (туманоуловители), предназначенные для предотвращения попадания цикловой воды на воздушные фильтры КВОУ ГТУ.

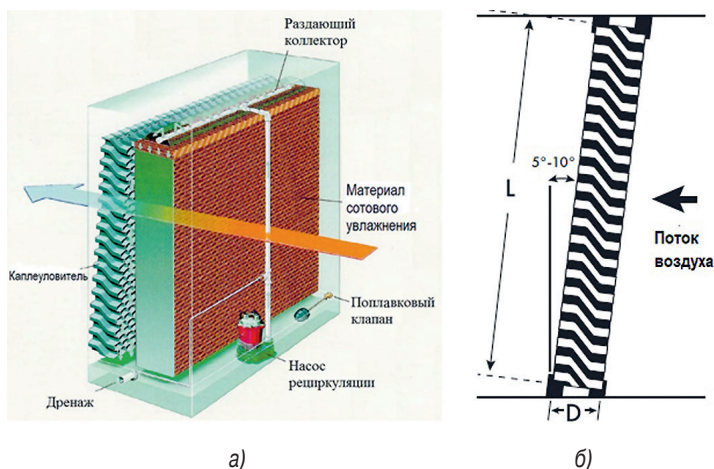


Рис. 8.62. ОУ ИТ компании Munters: а) модуль; б) установка каплеуловителя

По информации Munters, модульные блокирующие туманоуловители DRIFdek-IL отличаются простотой монтажа, самоуплотняющейся конструкцией и отличным отделением капель. Они должны устанавливаться в ОУ ИТ в вертикальном положении под углом $5-10^\circ$ (рис. 8.62б) и при скоростях воздушного потока 2,5–3,5 м/с удаляют более 99% капель размером свыше 65 мкм.

Каплеуловитель Munters представляет собой ячеистую структуру, похожую на пчелиные соты, образующие S-образные каналы (рис. 8.63).

Отделение капель воды от воздушного потока зависит от сил инерции и, следовательно, от размера и скорости капель. Когда воздух проходит через S-образные каналы модульных туманоуловителей DRIFdek-IL, тяжелые капли воды падают на внешнюю сторону каждого канала. Они всасываются воздушным потоком в дренажные каналы, образуя капли, достаточно крупные, чтобы выпадать с входной стороны туманоуловителей, не задерживаясь повторно. Поскольку собранная вода находится на входной стороне S-образного канала, нет необходимости в отдельном желобе для сбора воды под каплеуловителем. Сотовая конструкция DRIFdek-IL позволяет стыковать модули. Стыковочное соединение Б образуется ультразвуковой сваркой соседних модулей (рис. 8.63б).

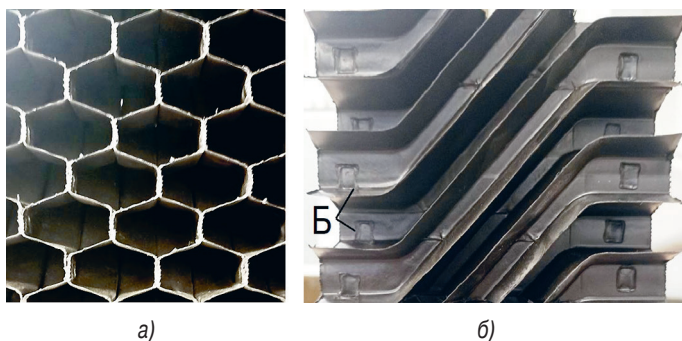


Рис. 8.63. Каплеуловитель DRIFdek-IL: а) фронтальный вид;
б) вид сбоку. Б – стыковочное соединение

Модульные туманоуловители DRIFdek-IL изготавливаются из прочного и неагрессивного ПВХ-компаунда, способного обеспечить длительную эксплуатацию в различных условиях окружающей среды. Он устойчив к ультрафиолетовому излучению и обычным загрязнениям воды. Рабочий диапазон температур в эксплуатации и хранении этих изделий не должен превышать 58,8 °С.

Компания Munters утверждает, что разработанная модульная сотовая структура делает конструкцию каплеуловителя DRIFdek-IL очень жесткой и прочной.

Критерием проверки правильности принятых конструкторских решений любых изделий является их эксплуатация. Опыт эксплуатации ОУ ИТ ГТУ Munters на блоках ПГУ отечественных энергетических компаний в течение нескольких лет показал, что заявленные производителем технические характеристики выполняются не всегда. В первую очередь это касается прочности и надежности МСУ и каплеуловителей. И если невысокие прочностные характеристики МСУ обусловлены хрупкостью целлюлозы, то повреждаемость каплеуловителей, изготовленных из высокопрочного ПВХ-компаунда, вызывает обоснованные вопросы.

На *фото 8.64* представлены типичные повреждения каплеуловителей DRIFdek-IL, зафиксированные на ОУ ИТ компании Munters на отечественных блоках ПГУ.

Приведенные примеры однозначно указывают на недостаточную прочность конструкции каплеуловителей DRIFdek-IL. В результате этих повреждений цикловая вода, не впитавшаяся в МСУ, в больших (нерасчетных) количествах начинает проникать через каплеуловители на воздушные фильтры КВОУ энергетических ГТУ (*фото 8.65*).

В результате растет перепад давления на входе в ГТУ и снижается выработка электроэнергии. Возникает парадоксальная ситуация — ОУ ИТ, предназначенная для повышения мощности энергетической ГТУ при высоких температурах наружного воздуха, оказывает негативное влияние на этот параметр.

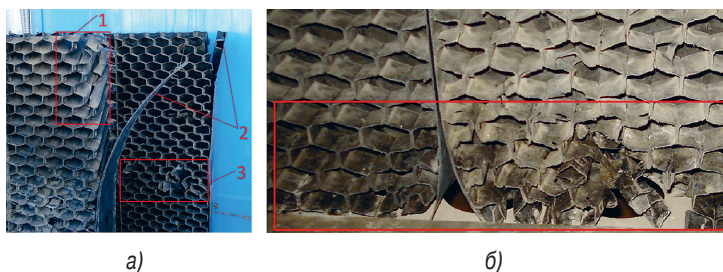


Фото 8.64. Типичные повреждения каплеуловителей DRIFdek-IL: а) 1 — расслоение сотовых ячеек, 2 — отслоение боковых фиксаторов модулей, 3 — разрушение сотовых ячеек; б) деформация сотовых ячеек модулей нижнего ряда

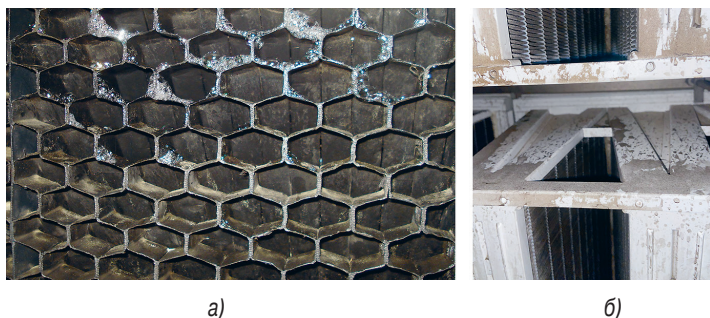


Фото 8.65. Поступление воды: а) за каплеуловителем DRIFdek-IL; б) на фильтры тонкой очистки КБОУ ГТУ

Для выяснения причин повреждений каплеуловителей DRIFdek-IL и негативных последствий проанализируем геометрические размеры их сотовых ячеек и сравним с каплеуловителями отечественного производителя ООО «Фильтрационные Технологии» (рис. 8.66).

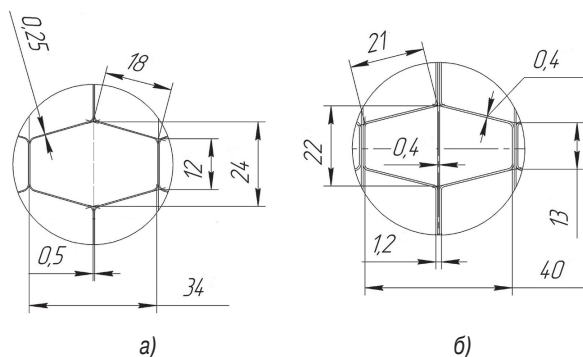


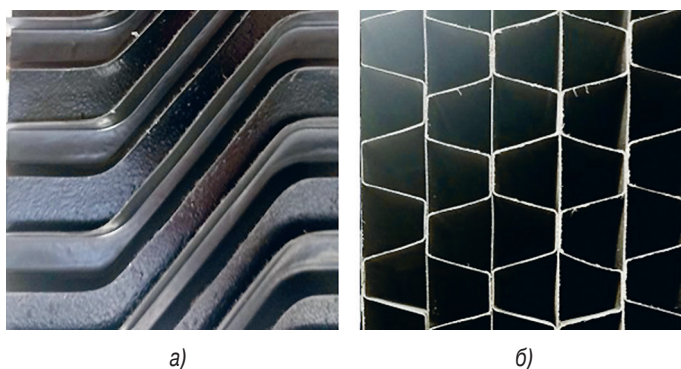
Рис. 8.66. Геометрические размеры каплеуловителей: а) DRIFdek-IL; б) ООО «Фильтрационные Технологии»

Каплеуловитель ООО «Фiltrационные Технологии» также представляет собой ячеистую структуру, образующую S-образные каналы из ПВХ-компаунда, устойчивого к ультрафиолетовому излучению. Отечественный ПВХ-компаунд отличается от иностранного добавлением в состав специальной присадки, влияющей на его горючесть. Толщина листов ПВХ-компаунда отечественного производителя составляет 0,4 мм, что в 1,6 раза превышает аналогичный размер (0,25 мм) каплеуловителей DRIFdek-IL.

Другим отличием является то, что S-образные листы соединены друг с другом химическим способом, а не ультразвуковой сваркой.

Однако главным отличием отечественных каплеуловителей является установка между S-образными листами армирующих плоских листов толщиной 0,4 мм, что, по мнению проектировщиков, усилит защиту ячеек от механических воздействий, приводящих к деформации. Кроме того, толщина склеенных листов, соединяющих рядом стоящие сотовые ячейки, на отечественных каплеуловителях достигла 1,2 мм, что в 2,4 раза превышает аналогичный размер на иностранных изделиях (0,5 мм). Конфигурация отечественного каплеуловителя показана на *рис. 8.67*.

Для определения влияния принятых конструкторских решений были протестированы образцы новых изделий на аэродинамическом стенде ООО «Фiltrационные Технологии» и сравнены с каплеуловителями DRIFdek-IL [20].



*Рис. 8.67. Каплеуловитель ООО «Фiltrационные Технологии»:
а) вид сбоку, б) фронтальный вид*

Для этого из полноразмерных кассет каплеуловителей обоих производителей были вырезаны образцы (*табл. 8.11*), которые для исключения возможных утечек воздуха во время тестирования были заключены в корпуса из нержавеющей стали (*фото 8.68*).

Образцу иностранного производителя был присвоен № 1, отечественного — № 2, корпусу из нержавеющей стали — № 3. После этого образцы были взвешены (*табл. 8.11*).

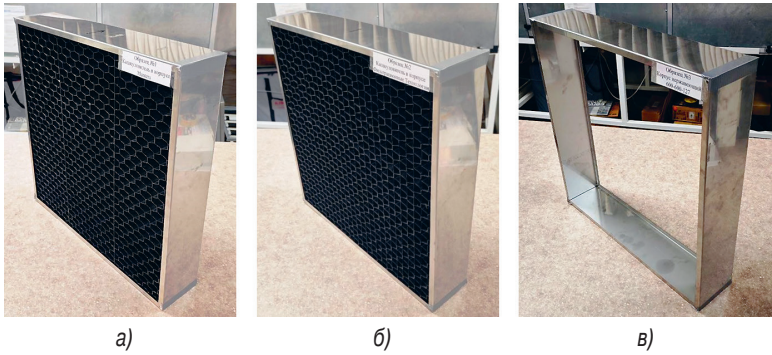


Фото 8.68. Образцы каплеуловителей:

а) Munters; б) ООО «Фильтрационные Технологии», в) корпус из нержавеющей стали

Таблица 8.11

Массогабаритные показатели образцов

	№ 1	№ 2	№ 3
Габариты (Ш×В×Г), мм	600×600×127		
Масса, г	3755	5476	2261

Из табл. 8.11 видно, что масса образца № 2 отечественного производителя в 1,46 раза больше образца № 1, а без металлического корпуса — в 2,15 раза.

Результаты тестирования образцов на аэродинамическом стенде (фото 8.69а) представлены на рис. 8.69б.



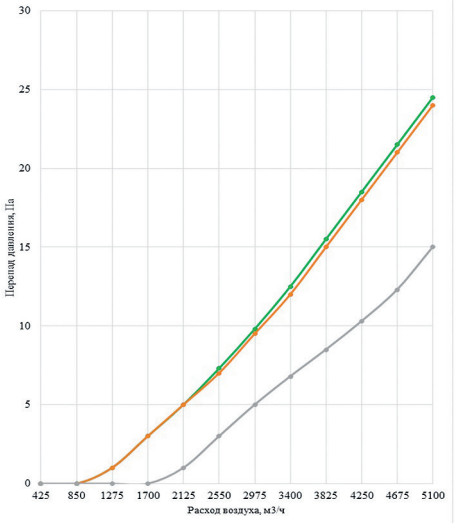
а)

- Образец № 1, каплеуловитель в корпусе Munters
- Образец № 2, КСУ-каплеуловитель в корпусе Munters
- Образец № 3, корпус нержавеющей 600-600-127

Рис. 8.69. Тестирование образцов:

а) аэродинамический стенд;

б) перепад давления



б)

Как видно из представленных графиков, перепады давления на образцах каплеуловителей № 1 и № 2 практически идентичны и при расходе воздуха 3400 м³/ч составляют 13 Па и 12 Па соответственно.

Таким образом, усиление конструкции каплеуловителя отечественного производителя в данном случае сказалось только на увеличении массы изделия.

Следующим этапом исследований явилось определение влияния проектных решений конструкции отечественного каплеуловителя на его прочностные характеристики и сравнение их с зарубежным аналогом. С этой целью были выполнены испытания обоих образцов каплеуловителей на разрыв на специальном стенде XHL-02 (фото 8.70).

Массогабаритные характеристики образцов каплеуловителей для тестирования на разрыв приведены в табл. 8.12.

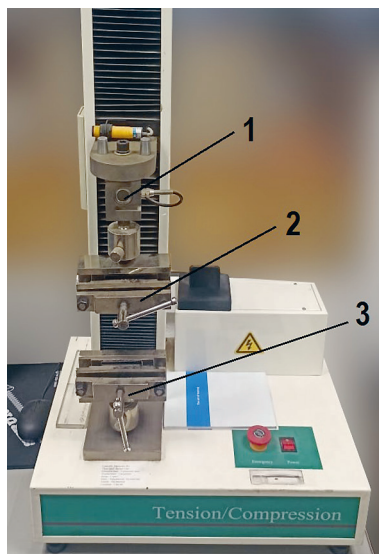


Фото 8.70. Стенд для испытания на разрыв: 1) тензодатчик; 2) подвижный зажим; 3) неподвижный зажим

Таблица 8.12

Массогабаритные характеристики образцов каплеуловителей для тестирования на разрыв

	№ 1	№ 2
Габариты (В×Ш×Т), мм	100×100×125	
Масса без оснастки, г	36,12	95,14
Масса с оснасткой, г	596	652

Края образцов были закреплены в металлической оснастке, после чего они устанавливались в зажимах стенда, расстояние между которыми 100 мм. Программное обеспечение разрывной машины задавало скорость движения подвижного зажима 100 мм/мин. Стенд приводился в движение, и измерялась разрывная нагрузка — максимальная сила на растяжение до разрыва (фото 8.71).

В результате испытаний было установлено, что разрыв образца компании Munters (фото 8.71б) произошел при нагрузке 82 Н. Образец ООО «Фильтрационные Технологии» в процессе теста не был поврежден, его вырвало из крепежной оснастки при нагрузке на разрыв в 2813 Н (фото 8.71г).

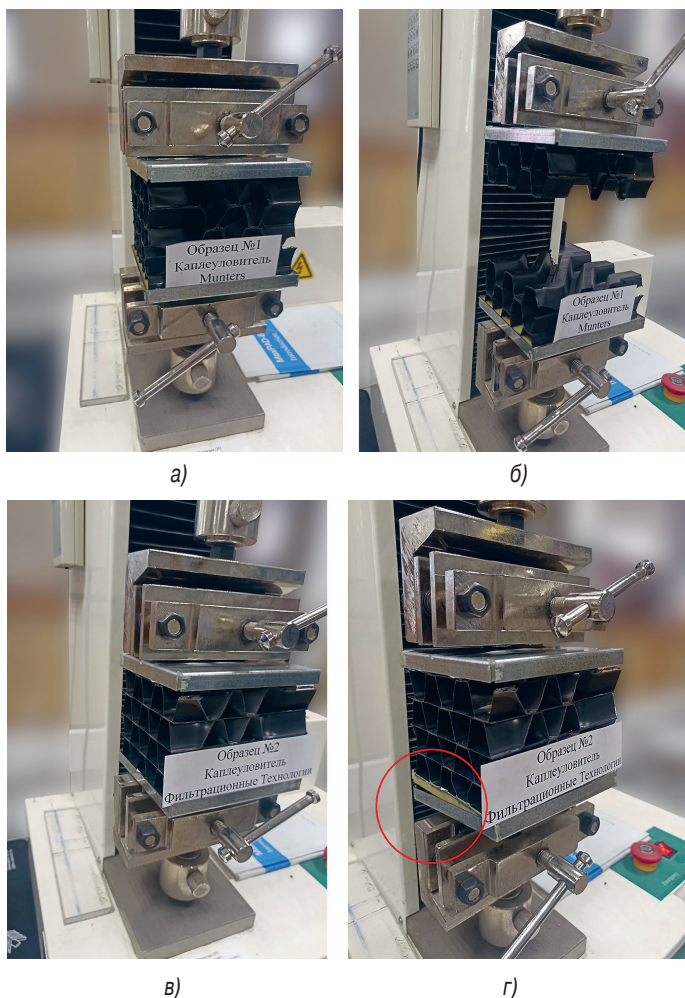


Фото 8.71. Тестирование образцов на разрыв: а), б) образец № 1 до и после испытаний; в), г) образец № 2 до и после испытаний

Это свидетельствует о том, что сотовый материал каплеуловителя прочнее его крепления с материалом оснастки.

Таким образом, техническое решение по усилению конструкции отечественного каплеуловителя привело к увеличению нагрузки на разрыв по сравнению с каплеуловителем Munters более чем в 34 раза.

Как отмечалось ранее, рабочий диапазон температур в эксплуатации и хранении каплеуловителей Munters не должен превышать $+58,8^{\circ}\text{C}$, при этом нижняя граница температур не обозначена. В соответствии с отечественным

ГОСТ 15050–69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды» для нашей огромной страны макроклиматические районы варьируются в широком диапазоне рабочих температур, где верхние значения достигают $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а нижние $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом предельные рабочие температуры выходят за пределы этого диапазона. Следует отметить, что для ряда климатических условий рекомендуется принимать значения дополнительных увеличений температуры изделий за счет нагрева солнечными лучами на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. С учетом этих рекомендаций предельные рабочие положительные температуры могут достигать $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Мониторинг параметров циклового воздуха энергетических ГТУ при эксплуатации ОУ ИТ на отечественных ТЭЦ показал, что относительная влажность варьируется в диапазоне 95–100% [21].

Для определения соответствия каплеуловителей ООО «Фильтрационные Технологии» и компании Munters требованиям ГОСТ 15050–69 их образцы тестировались в климатической камере BST-TH-408D (фото 8.72) согласно межгосударственного ГОСТ 30630.2.1–2013.

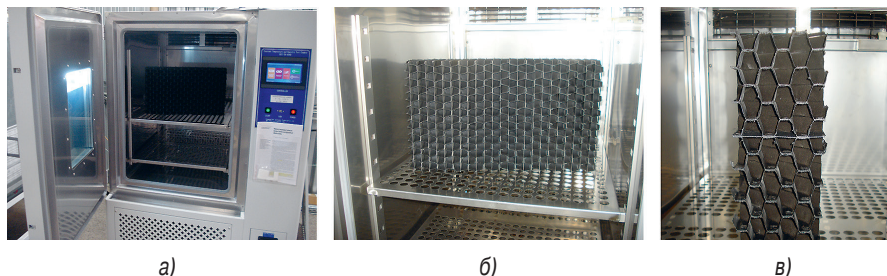


Фото 8.72. Испытание каплеуловителей на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам: а) климатическая камера BST-TH-408D; б) образец ООО «Фильтрационные Технологии»; в) образец Munters

Климатическая камера герметично закрывалась, устанавливалось нижнее значение температуры, предусмотренное для транспортировки и хранения изделий, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. При достижении установленной температуры запускался таймер фиксации времени выдержки. По истечении 5 часов образцы приводились к нормальным условиям, затем производился внешний и тактильный осмотр образцов для оценки их состояния.

Аналогичные испытания выполнялись и для определения воздействия верхнего значения температуры воздуха. В данном случае устанавливались температура $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительная влажность 98%.

В результате климатических испытаний установлено, что воздействие низкой ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) и высокой ($+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ с повышенной влажностью 98%) температуры не

повлияло на их механические свойства. Повреждений ПВХ-компаунда и отслоений в местах ультразвуковой сварки и склейки сотовых ячеек не обнаружено.

Последним этапом стали испытания на горючесть материала. Как отмечалось ранее, каплеуловители обоих производителей изготовлены из ПВХ-компаунда. Однако в состав компаунда отечественного производителя входит специализированная присадка.

Для этих испытаний были подготовлены образцы размером 100×100×125 мм, которые подвергались воздействию открытого огня газовой горелки. В процессе тестов велась фото- и видеофиксация изменения состояния образцов, а также хронометраж времени воздействия на них открытого огня. Воздействие пламени на образцы ограничивалось 10 секундами.

В результате тестирования образцов каплеуловителей на горючесть было установлено: каплеуловитель DRIFdek-IL компании Munters, изготовленный из ПВХ-компаунда, горюч. В отсутствие открытого огня продолжается горение, плавление и тление материала до полного разрушения (в течение 1343 с, фото 8.73).

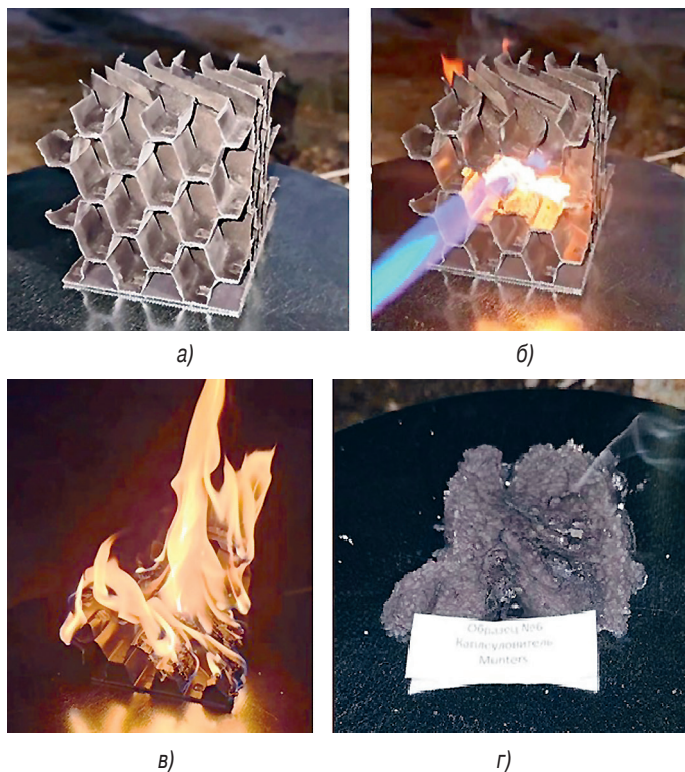


Фото 8.73. Испытание на горючесть образца каплеуловителя Munters: а) перед испытанием; б) во время испытания; в) горение образца; г) после испытаний

Каплеуловитель ООО «Фильтрационные Технологии», также изготовленный из ПВХ-компаунда, но со специальной присадкой, не горюч. В отсутствии воздействия пламени горение затухает (*фото 8.74*).

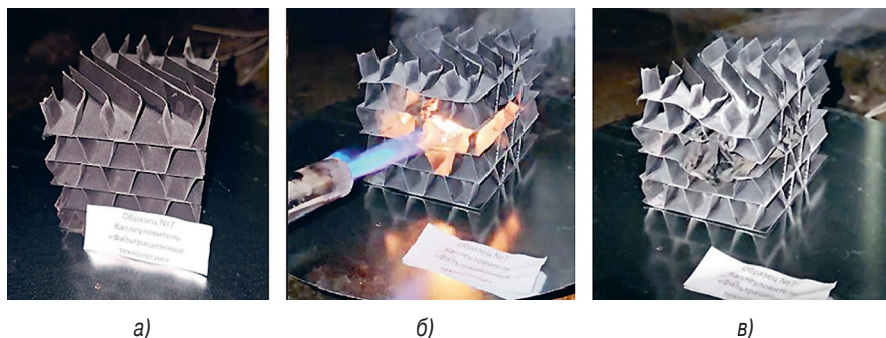


Фото 8.74. Испытание на горючесть образца каплеуловителя ООО «Фильтрационные Технологии»: а) перед испытанием; б) во время испытания; в) после испытания

Выводы:

- повреждаемость каплеуловителей компании Munters в процессе эксплуатации ОУ ИТ энергетических ГТУ обусловлена недостаточной прочностью их конструкции и соединений, выполненных ультразвуковой сваркой;
- конструкция каплеуловителей ООО «Фильтрационные Технологии» усилена дополнительным поперечным ребром жесткости в сотовых ячейках и склеиванием их поверхностей, что предотвращает их деформацию и повреждения в процессе эксплуатации;
- техническое решение ООО «Фильтрационные Технологии» по усилению конструкции каплеуловителя привело к увеличению их нагрузки на разрыв по сравнению с каплеуловителем Munters более чем в 34 раза и росту веса в два раза;
- аэродинамические характеристики каплеуловителей обоих производителей идентичны;
- испытание каплеуловителей на стойкость к воздействию внешних факторов окружающей среды показали, что изделия ООО «Фильтрационные Технологии» соответствуют требованиям ГОСТ 15015–69. У них отсутствуют ограничения рабочего диапазона температур в эксплуатации и хранении не выше +58,8 °С, предписанные компанией Munters для своих каплеуловителей;
- каплеуловители ООО «Фильтрационные Технологии», изготовленные из ПВХ-компаунда со специальной присадкой, не горят в отличие от каплеуловителей Munters, произведенных из того же материала.

Самый редкий вид дружбы -
это дружба с собственной головой
Омар Хайям

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последнее десятилетие ознаменовалось всплеском интереса к повышению выработки мощности ГТУ при повышенной температуре окружающей среды путем охлаждения атмосферного воздуха на входе в КВОУ турбомашины. Сейчас на отечественных блоках ПГУ используется девять ОУ ИТ (*табл.*).

Применение ОУ ИТ ГТУ на отечественных ТЭЦ

ТЭЦ	Тип ГТУ	Мощность ГТУ, МВт	Количество	Разработчик ОУ ИТ	Год
Краснодарская ТЭЦ (ООО «Лукойл-Кубань-Энерго»)	MHI 701F4	303	1	Munters	2014
ПАО «Мосэнерго» (ООО «Газпром энергохолдинг»)	SGT5–4000F	276	2		2019, 2020
ПАО «Мосэнерго» (ООО «Газпром энергохолдинг»)	ГТЭ-160	165	1		2021
Новогорьковская ТЭЦ (ПАО «Т Плюс»)	Alstom GT 13E2	180	2		2021
Затонская ТЭЦ (ООО «Башкир-энерго», АО «Интер РАО»)	ГТЭ-160	165	2		2023
Невинномысская ГРЭС (ПАО «ЭЛС-Энерго»)	SGT5–4000F	305	1		2024
Итого			9		

Системы охлаждения циклового воздуха ГТУ водой нашли свое применение и на компрессорных станциях. Таким примером служит компрессорная станция природного газа «Портовая» под Выборгом в Ленинградской области, где охлаждение воздуха перед фильтрами КВОУ ГТУ мощностью 32 МВт осуществляется распылом воды через форсунки.

К сожалению, некоторые энергетические компании поддались модной тенденции установки оборудования ОУ ИТ на своих блоках ПГУ без учета

реальных климатических условий эксплуатации их оборудования. Зачастую при проработке инвестиционного проекта по внедрению ОУ ИТ на ТЭЦ климатические условия анализируются только за последние 3–5 лет. Для привлекательности инвестиционного проекта по сроку окупаемости прибегают к различным механизмам его «оптимизации»: меняют рекомендованную инструкцией по эксплуатации оборудования химическую очищенную воду (ХОВ) на водопроводную, необоснованно завышают срок службы испарительных кассет и каплеуловителей ОУ ИТ ГТУ и т. д. Результаты такой «оптимизации» мгновенно проявляются во время эксплуатации оборудования и негативно сказываются на эффективности использования ОУ ИТ и экономических показателях. Под воздействием растворенных в водопроводной воде примесей на испарительных кассетах ОУ ИТ образуются отложения даже при использовании антибактериального биоцида, коллекторы подачи цикловой воды и трубопроводы дренажа дросселируются попадающими на кассеты пылью и песком, двукрылыми насекомыми и плодами цветения растений.

Другими словами, «бумеранг» неоптимальных проектных решений при обосновании финансовой модели проекта возвращается к их создателям в виде многочисленных технических проблем, одной из которых является замена водораспределительных, испарительных кассет и каплеуловителей ОУ ИТ. В инвестиционных проектах ОУ ИТ, как отмечалось выше, зачастую закладывают максимальный срок службы этого оборудования 7 лет. При этом совершенно не учитывается цикловой процесс снятия-установки кассет и каплеуловителей после окончания весенне-летнего периода эксплуатации и перед началом нового. Именно во время этих монтажных/демонтажных работ и происходит наибольшее количество повреждений хрупкой поверхности материала сотового увлажнения (МСУ). Из-за повреждения МСУ образуются щели между кассетами при их установке в ОУ ИТ, способствующие проникновению влаги на каплеуловители, минуя сами кассеты. Каплеуловители не в состоянии справиться с таким нерасчетным количеством воды, пропускают ее на воздушные фильтры КВОУ ГТУ. Следствием этого является рост перепада давления на воздушных фильтрах и снижение выработки электроэнергии ГТУ.

Кроме того, не учитывается интенсивность загрязнения самих кассет ОУ ИТ по причине воздействия на них факторов окружающей среды из-за заблуждения, что цикловая вода полностью смывает все образовавшиеся на них отложения. Как показали опыт эксплуатации и результаты дефектации, срок службы кассет при базовой защите ОУ ИТ ГТУ противомоскитными сетками и существующей культуре обслуживания составляет 3–5 лет. При этом оптимальным сроком можно считать три года, поскольку повреждения, полученные во время монтажа/демонтажа кассет, увеличение их массы, а следовательно, и перепада давления в результате загрязнения не позволяют в дальнейшем добиваться оптимального процесса испарения влаги и достичь желаемой эффективности процесса.

Опыт эксплуатации энергетических ГТУ показал, что *основными факторами, снижающими эффективность работы ОУ ИТ* в Московской регионе, являются:

- несоответствие погодных условий (температуры и влажности атмосферного воздуха) прогнозным данным, май и сентябрь являются месяцами с неустойчивой погодой;
- несмотря на то что июль является самым теплым месяцем, одновременно он и самый дождливый с высоким уровнем относительной влажности;
- остановки ПГУ для проведения ремонтов во время весенне-летнего периода эксплуатации;
- эксплуатационный износ и повреждения испарительных кассет во время монтажных/демонтажных работ;
- интенсивное загрязнение водоводов и испарительных кассет осадками из водопроводной и умягченной цикловой воды;
- интенсивное загрязнение испарительных кассет тополиным пухом, двукрылыми насекомыми и пылью;
- недостаточная прочность и эффективность каплеуловителей, приводящая к попаданию влаги на фильтры КВОУ и росту перепада давления на них;
- эксплуатация ПГУ в режимах регулирования частоты в энергосистеме.

Выводы:

– наибольшая эффективность при использовании ОУ ИТ достигается в летнее время при полном открытии ВНА осевого компрессора ГТУ за счет расширения регулировочного диапазона нагрузок;

– значительное влияние на эффективность охлаждения циклового воздуха ГТУ и затраты на собственные нужды ОУ ИТ оказывает качество цикловой воды;

– отношение дополнительно генерируемой электрической мощности к коэффициенту использования ОУ ИТ ГТУ является важным показателем ее эффективности;

– использование ОУ ИТ для ГТУ предусматривает применение на первой ступени воздухоочистки КВОУ фильтров-коагуляторов с высокой степенью водостойкости, изготовленных, например, по технологии DropSafe;

– применение ОУ ИТ на энергоблоках ПГУ, расположенных в регионах с устойчивым сухим и теплым климатом, позволяет наиболее эффективно использовать охлаждение циклового воздуха ГТУ по адиабатическому процессу и увеличить выработку электроэнергии при высоких температурах окружающей среды;

– в ЦФО России для охлаждения циклового воздуха энергетических ГТУ наиболее целесообразно использование АБХМ.

Рекомендации:

- во время процедуры закупки кассет для ОУ ИТ ГТУ запрашивать у поставщиков образцы предлагаемых изделий и проверять их на впитываемость воды по разработанному экспресс-методу с целью сравнения;
- паспорта изделий должны быть представлены от производителя, а не от дистрибьютора или поставщика;
- во время входного контроля кассет и каплеуловителей проводить не только визуальный, но и инструментальный осмотр;
- перед установкой новых кассет на ОУ ИТ ГТУ их необходимо пронумеровать, чтобы каждый раз помещать на обозначенное место на конкретном ярусе и всасе;
- для снижения повреждаемости материала кассет при их монтаже/демонтаже на ОУ ИТ использовать разработанное техническое решение в виде защитных корпусов (оболочек) из нержавеющей стали;
- для снижения загрязнения поверхности кассет ОУ ИТ ГТУ от двукрылых насекомых, тополиного пуха, плодов цветения растений использовать разработанное техническое решение на базе РРІ;
- каплеуловители, изготовленные из ПВХ-компаунда, должны обладать дополнительным ребром жесткости для обеспечения надежности;
- анализ продукции зарубежных и отечественных производителей (поставщиков) изделий для ОУ ИТ ГТУ, а также тестирование их образцов продукции на энергетических объектах показали, что из доступных в настоящее время производителей оптимальной по соотношению цены и высокого качества является отечественная компания «Фильтрационные Технологии».

Причина ошибки — незнание лучшего
Демокрит

КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Карл Мунтерс родился 22 марта 1897 г. в Швеции. В 1918 году был зачислен в Королевский технологический институт. Во время учебы в 1922 году вместе с сокурсником разработал абсорбционный холодильник для бытового использования. Изобретение было запатентовано в 1923 году, а в 1925 году изобретатели получили премию Полхейма. В 1925 году они продали патентные права основателю компании Electrolux А. Веннер-Грену. Так появился первый в мире абсорбционный холодильник, который работал на газе, керосине или электричестве.



Карл Георг Мунтерс (Carl Georg Munters) (https://ru.wikipedia.org/wiki/Мунтерс_Карл)

В 1955 году К. Мунтерс вместе с партнерами основал собственную компанию *Munters & Co*, ныне ставшую мировым лидером в производстве систем сорбционного осушения, испарительного увлажнения и охлаждения воздуха. Умер К. Мунтерс 29 марта 1989 года в возрасте 92 лет. За свою жизнь Карл Мунтерс подал заявки почти на 1000 патентов, в основном в области осушения воздуха и испарительного охлаждения. За свои разработки он награжден премией Польхема, медалью Джона Прайса Ветерилла (https://ru.wikipedia.org/wiki/Мунтерс_Карл). На зимнем заседании 2017 года американское общество инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха (ASHRAE) удостоило Карла Мунтерса звания «Пионера отрасли» за вклад в развитие систем кондиционирования, отопления, охлаждения и вентиляции (<https://munters-russia.ru>).

В формате книги целесообразно показать некоторые оригинальные технические решения, которые легли в основу изобретений К. Мунтерса по адиабатическому охлаждению воздуха. Его первоначальный замысел заключался в разработке системы кондиционирования воздуха на базе использования испарительного охлаждения и осушения. При разработке ключевыми компонентами системы являлись влагопоглощающий ротор (основной элемент осушения) и испарительные насадки.

В ноябре 1961 года К. Мунтерс получает патент «Apparatus and method of conditioning the steam of incoming air by the thermodynamic exchange with separate streams of other air» (3,009,684 от 21.11.1961), в котором описывается способ кондиционирования воздуха, поступающего в помещение. Схема установки, собственноручно подписанная автором, представлена на *рис. III*.

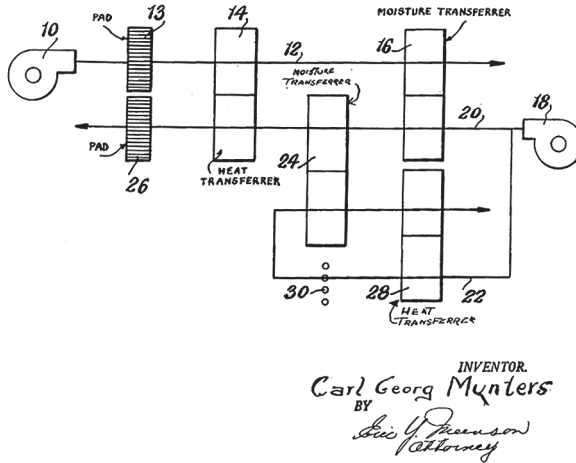


Рис. III. Схема работы устройства

Описание изобретения. Воздух из помещения удаляется в атмосферу через канал 12 под действием вентилятора 10. Перед этим он охлаждается, проходя через испарительные кассеты 13 (PAD). Адиабатически охлажденный в PAD воздух поступает в теплообменник 14, где нагревается, а затем проходит через верхнюю часть устройства переноса влаги 16 (moisture transferer), где нагревает и высушивает его гигроскопичную упаковку.

Входящий наружный воздух под действием вентилятора 18 поступает в два канала 20 и 22. Через канал 20 воздух подается в помещение, в то время как через канал 22 часть воздуха возвращается в атмосферу после прохождения им теплообменника 28 и устройства переноса влаги 24. Наружный воздух, движущийся по каналу 20, сначала проходит через нижнюю часть устройства переноса влаги 16, которое циклически перемещается по обоим каналам 12 и 20, где удаляется влага и повышается температура за счет термодинамического обмена с выходящим воздухом, проходящим через верхнюю часть устройства 16.

Частично высушенный и нагретый таким образом поступающий воздух затем пропускают через устройство переноса влаги 24, воздух, циклически перемещаясь по каналам 20 и 22, нагревается и сушится за счет обмена с воздухом, обработанным в канале 22. В конце концов поступающий воздух

пропускается через испарительные кассеты 26, где достигает окончательного психрометрического состояния перед подачей в помещение.

Часть наружного воздуха, движущаяся по каналу 22, в свою очередь проходит через нижнюю часть теплообменника 28 и затем, после нагревания элементом 30, поступает в нижнюю часть кассет 24, где регенерируется. Далее еще теплый воздух проходит через верхнюю часть теплообменника 28, где передает тепло части входящего воздуха в канале 22 и таким образом предварительно нагревается перед подачей в нагревательный элемент 30.

Можно отметить, что нагревательный элемент не ограничен местом, показанным на чертеже. Как было ранее сказано, основной целью нагревательного элемента является повышение температуры воздуха в канале 22 для регенерации кассет 24. Таким образом, нагревательный элемент 30 может быть расположен в верхней или в нижней части канала 22 или в любой другой части установки, где он бы смог выполнять свои функции. Предполагается, что теплообменники 14 и 28 сконструированы так, что они передают в основном тепло и сравнительно мало влаги.

Целью устройств переноса влаги 16 и 24 является передача влаги от одного воздушного потока к другому. Для достижения как можно более высокого коэффициента переноса влаги эти кассеты не должны передавать тепло совсем или передавать его лишь в незначительном количестве. Элементы, передающие влагу, относятся к регенеративному типу, включающему передающий элемент (насадку), который циклически перемещается поперек потоков, между ними осуществляется термодинамический обмен. Секция переноса влаги может состоять из лабиринта проволок или слоев перегородок из фольги, но предпочтительнее из гофрированной или сотовой структуры из асбестовой бумаги или бумаги из целлюлозных волокон, которая по своей природе является гигроскопичным веществом и, помимо этого, должна быть обработана специальным веществом для повышения гигроскопичных свойств.

Через шесть лет (21.06.1967) Карл Мунтерс получает патент «Liquid and gas contact apparatus» (1,073,315). Данное устройство имеет корпус, внутри которого установлено контактное тело для жидкости и газа (испарительные гофрированные кассеты), оно состоит из гофрированных листов, через которые обе среды проходят одновременно. В качестве контактных сред представлены воздух и вода. В своем изобретении К. Мунтерс ссылается на ранее опубликованный в Великобритании патент № 1,055,796. В нем описываются охлаждающие кассеты, в которых гофры соседних листов наклонены относительно вертикали. Таким образом пространству между листами придается плавно изменяющаяся ширина, в результате чего направление потока сред неоднократно меняется во время прохождения через кассету. Цель изобретения 1,073,315 состоит в том, чтобы обеспечить дальнейшее усовершенствование контактного тела такого типа, в котором основное направление газа по горизонтали, а жидкость движется вертикально сверху вниз; отличием их друг от

друга является разница в углах, при этом первая цель состоит в организации таких углов наклона между гофрами, чтобы обеспечить оптимальный обмен между средами. Второй целью настоящего изобретения является обеспечение равномерного распределения сред по всему контактному телу. Такое распределение важно не только для улучшения теплообмена между средами, но и для недопущения засорения каналов отложениями солей и прочими включениями при застое одной из сред.

В этом патенте использование представленного изобретения применимо к градирне для охлаждения воды, причем автор предложил два варианта исполнения данной установки. На *рис. 12а* представлен эскиз градирни, в которой испарительные кассеты наклонены относительно вертикали. Углы гофр соседних листов кассет равны, однако благодаря наклону модуля достигается разница в углах прохождения сред через испарительную кассету.

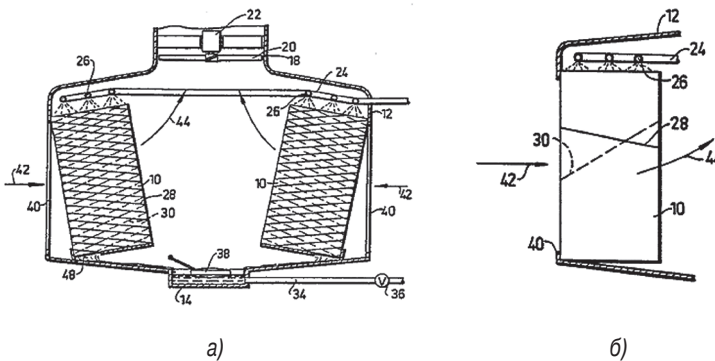


Рис. 12. Градирни: а) с наклонными испарительными кассетами: 10 — испарительные кассеты; 14 — желоб для сбора воды; 24 — распределительные трубы для жидкости; 12 — кожух; 40–44 — направление воздуха; 38 — поплавок для контроля уровня воды; 34 — патрубок отвода воды; 20 — вентилятор; 22 — привод вентилятора; б) с вертикально-установленными испарительными кассетами

На *рис. 12б* показана идентичная установка, но в ней, в отличие от предыдущей, испарительные кассеты расположены вертикально, а листы установлены так, чтобы гофры одного набора листов имели больший угол относительно горизонтали (со стороны воды менее 45° ($20\text{--}35^\circ$), чем второй набор гофрированных листов со стороны воздуха (допускается 0° (горизонтальное расположение)).

Шестого августа 1968 года Джордж В. Мик, Форт Майерс, Флорида (правопреемник компании *Munters & Co*) получил патент 3,395,900 «Gas and liquid contact apparatus». В данном патенте представлено описание установки для охлаждения и увлажнения воздуха с использованием контактного тела (*рис. 13а, поз. 10*). В представленном изобретении описывается улучшенная система подачи воды на испарительные кассеты с целью оптимального

смачивания кассет, эффективного удаления отложений солей и пыли, а также недопущения уноса капель воды с потоком воздуха. Контактное тело 10 состоит из множества расположенных напротив друг друга гофрированных листов 24, причем гофры или смежные листы пересекаются. Эти листы изготовлены из влагопоглощающего материала, такого, как целлюлозная или асбестовая бумага (рис. И3б).

Система подачи воды представлена в следующем исполнении: вода поступает по трубе 32 (рис. И3а), которая имеет ответвления 34, расположенные над каждым желобом 28. Каждое ответвление снабжено клапаном 36. Желоба 28 расположены между испарительными кассетами и средствами подачи воды и выполнены с возможностью периодического наклона: когда желоба заполняются до заданного уровня, вода выливается и стекает вниз через каналы в испарительных кассетах, а затем желоба возвращаются в первоначальное положение. Под контактным телом 10 расположен поддон 38 для сбора неиспарившейся воды. Эта вода по трубе 32 возвращается в желоба 28 при помощи насоса 40.

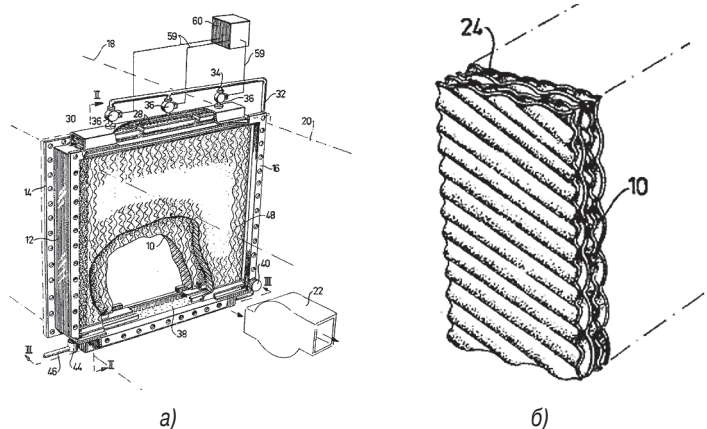


Рис. И3. Устройство для увлажнения и охлаждения воздуха с усовершенствованной системой подачи воды: а) общий вид; б) контактное тело

Помимо этого, в патенте упоминается каплеуловитель (рис. И3а, поз. 48). Он устанавливается сразу за испарительными кассетами со стороны выхода воздуха для улавливания жидкости, не испарившейся с поверхности кассет и дрейфующей вместе с потоком воздуха. Уловленная жидкость дренируется и возвращается в поддон 38. Каплеуловитель изготовлен из того же материала, что и кассеты, но имеет меньшую толщину по ходу воздуха. Также отмечено, что если увлажненный воздух будет подаваться в стерильные помещения («чистые комнаты»), то возврат дренажа с кассет и каплеуловителей обратно в систему не допускается.

Кроме того, в документе описывается оптимальная высота гофр листов испарительных кассет. Автор утверждает: если высота гофр будет слишком мала, то вода будет застаиваться в каналах, блокируя проход воздуха, к тому же повысится расход воды на испарительную установку и увеличится количество отложений в проходных сечениях. С другой стороны, при слишком высоких гофрах для обеспечения желаемого увлажнения потребуется увеличение длины контактного тела в направлении потока воздуха, и, как следствие, возрастет расход воды для оптимального смачивания материала. Было определено, что оптимальная высота гофр лежит в интервале от 2 до 9 мм.

Через два года, 07.01.1970 К. Мунтерс получает патент «Improvements in and relating to contact bodies» (1,177,124), в котором описывает способ повышения прочности испарительных кассет.

Автор заявляет, что листы испарительных кассет изготовлены из волокнистого материала, например асбестовой бумаги, и при эксплуатации требуется пропитка их термопластической смолой (фенольной или меламиновой), которая в дальнейшем подвергается отверждению для получения необходимой структурной прочности, особенно во влажном состоянии, но при такой обработке листы становятся хрупкими. К тому же объем воды, подаваемой на кассеты, достаточно велик, что предъявляет значительные требования к тонкослойному материалу. Помимо прочего, кассеты могут быть повреждены при транспортировке и установке.

Чтобы придать конструкции прочность, К. Мунтерс предлагает: слои кассет вдоль одного или нескольких краёв должны быть снабжены армирующим покрытием из пластикового материала относительно плотной консистенции. Кроме того, каждый армирующий слой может выступать за край слоя листа испарительной кассеты, и таким образом обволакивать его, образуя выпуклость.

Упрочняющий слой следует наносить на две противоположные стороны кассеты, которые образуют ее верхнюю и нижнюю грани. Такое решение обусловлено тем, что верхняя часть кассеты подвергается воздействию потока воды, а нижняя принимает на себя вес контактного тела. Армирующий слой следует изготавливать из огнестойкого материала.

Формирование упрочняющего слоя происходит погружением слоев в ванну с последующим застыванием материала на кассетах. Выпуклость (*рис. И4, поз. 48*) формируется по мере стекания упрочняющего материала. Стоит упомянуть, что в отличие от предыдущего патента 3,395,900 «Gas and liquid contact apparatus» от 06.08.1968, в котором записано, что оптимальная высота гофр кассет лежит в диапазоне от 2 до 9 мм, в данном патенте указывается, что этот диапазон составляет 5–20 мм (предпочтительно 10–15 мм). Такая высота выбрана с целью компенсации площади проходного сечения для жидкости и воздуха. Армирующий слой имеет выпуклость на краях кассет (*рис. И4*) и тем самым может вызвать дросселирование потока.

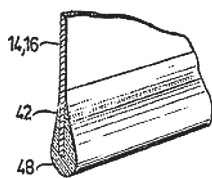


Рис. И4. Армирующий (упрочняющий) слой испарительных кассет

В июне 1970 года Карл Мунтерс получает патент «Method and apparatus for the production of diagonally corrugated sheet material» (1,194,003 от 10.06.1970), в котором описывает аппарат для изготовления гофрированных листов из целлюлозы или асбеста с целью использования в охлаждающих установках испарительного типа. Задачей изобретения являлось создание устройства и способа для гофрирования непрерывно движущегося полотна целлюлозного материала, в котором полотно транспортируют через форму для гофрирования с лентой, движущейся по замкнутому контуру и имеющей ряд поперечных гофров или канавок. При этом указанный способ включает в себя введение полотна в форму под таким углом к линии движения ленты, чтобы была возможность компенсирования смещения листа.

Устройство (рис. И5) содержит следующие основные части: секцию пропитки А, секцию гофрирования и сушки В и секцию С для разрезания готового бумажного полотна на куски или листы. Полотно 16 разматывается из рулона асбестовой бумаги 10, который поддерживается осью 12 в раме 14, и затем подается в секцию пропитки А. Секция пропитки имеет желоб 18 с подходящей пропиточной жидкостью, которая после термообработки придаст асбестовому материалу необходимую механическую прочность как во влажном, так и в сухом состоянии, а также защитит и укрепит полотно от повреждений. Подробное описание упрочняющего материала дано в патенте «Improvement sin and relating to contact bodies» (1, 177,124 от 07.01.1970).

Полотно 16, которое может иметь толщину около одной или нескольких десятых миллиметра, протягивается между валами 20 в ванну с жидкостью вокруг шкива 22, затем вверх по шкиву 24, а потом снова вниз в ванну с помощью шкива 26. Длина этой части полотна измеряется так, чтобы асбестовый материал мог полностью пропитаться раствором меламина. Любой избыток пропиточного раствора удаляется с полотна во время его движения вверх с помощью скребков 28, перед тем как оно протягивается через верхний шкив 30, а затем вниз между двумя валами 32 с поверхностью одного из полированной стали, а второго из синтетического каучука. Далее излишки пропиточного материала удаляются при прохождении материала между этими двумя валами до такой степени, чтобы исключить тенденцию застревания полотна в устройстве для гофрирования.

Валы и шкивы в системе пропитки приводятся в движение приводным механизмом (не показан на рисунке), скорость которого синхронизирована со скоростью системы гофрирования В, так что бумажное полотно будет подаваться с постоянной скоростью.

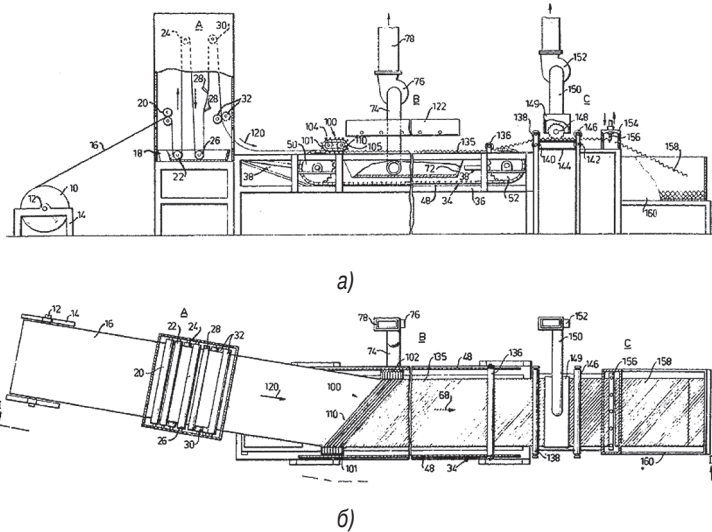


Рис. И5. Аппарат для изготовления гофрированных листов:
а) фронтальный вид; б) вид сверху

Секция В, примыкающая к пропиточной секции А, снабжена формирующим элементом, который выполнен с возможностью непрерывного перемещения 34 (рис. И5) и поддерживается рамой 36 (рис. И6). Формы гофрирования содержат ряд пластин 38 (рис. И6а), каждая из которых содержит рамку 40 и внутреннюю часть, имеющую диагонально идущие, взаимно-параллельные ребра и канавки 42.

Эти канавки могут быть образованы сплошной пластиной 44 (рис. И6а) или пластинчатыми элементами 46, которые согнуты под углом и немного отдалены друг от друга, как это показано на рис. И6б. Пластины должны быть тонкими, чтобы

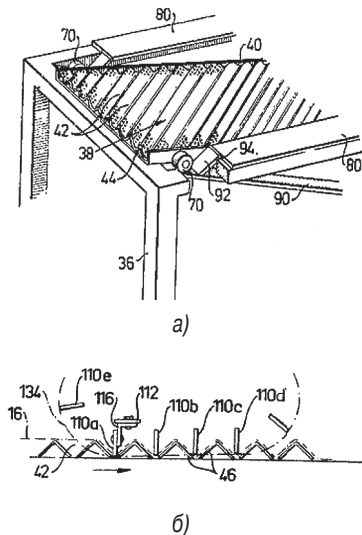


Рис. И6. Аппарата для изготовления гофрированных листов:
а) формирующий элемент секции;
б) процесс гофрирования

иметь как можно меньшую теплоемкость и к тому же перфорированы по всей поверхности, чтобы образующиеся во время сушки пары выходили наружу.

Пластины 38 приводятся в движение по непрерывному пути двумя цепями 48 с соответствующими звёздочками 50 и 52, установленными в подшипниках в раме и приводящимися во вращение двигателем через вал.

Под гофрированной лентой находится колпак 72 (см. *рис. И5*), закрытый снизу и по бокам, но открытый сверху. Он посредством воздуховода 74 соединен с вытяжным вентилятором 76, который, в свою очередь, соединен с воронкой 78. С помощью этого вентилятора в колпаке или камере 72 поддерживается частичный вакуум около 25–75 мм водяного столба.

Нагреватель 122 лежит над формирующей лентой и проходит практически по всей длине вакуумной камеры 72. Чаще всего это радиационный нагреватель, он может содержать электрические или газовые нагревательные элементы, которые создают более высокую температуру, например, 1000 °C или выше, так что целлюлозное полотно подвергается интенсивному тепловому излучению.

Угол α (рис. И7) диагональных канавок 42 определяется преобладающими факторами: например, в насадке градин, через которую проходят воздух и жидкость, угол может быть, как больше, так и меньше 45° .

Гофрирование по диагонали вызывает угловое натяжение бумажного полотна и уменьшение его ширины. Важно, чтобы полотно вводилось под таким углом к направлению движения формирующих элементов 38 и 100, чтобы это обеспечивало компенсацию бокового смещения материала. Этот угол показан

на рис. И9, где также указаны направления движения полотна 120 и 68.

Пропитанное влажное полотно 16 вводят между формирующими элементами 38 и 100 для гофрирования и последующей сушки. Гофры образуются за счет опускания реек 110 в канавки 42 одна за другой, при этом их продольное движение синхронизировано с перемещением канавок. На *рис. И66* одна планка или полоса 110а только что достигла дна канавки, вдавливая в нее перемычку 134, обозначенную пунктирной линией. Для удаления паров из бумажного полотна может быть предусмотрена специальная система вентиляторов. Готовые гофрированные листы направляются в секцию С для резки (*см. рис. И5*).

Через год К. Мунтерс получает патент «Improvements in and relating to liquid and gas contact apparatus» (1,253,878 от 17.11.1971). Данное изобретение также

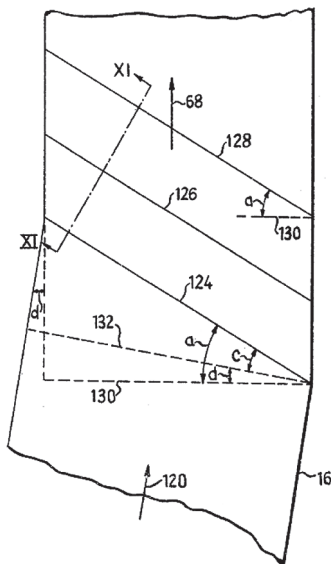


Рис. И7. Направления и углы формирования гофр

посвящено устройствам с охладительными установками испарительного типа.

В патенте описан способ усовершенствования испарительных кассет, а именно — снижения уноса жидкости потоком воздуха. Для этого формируются гофрированные листы из асбестовой бумаги с прорезями, проходящими последовательно в вертикальном направлении таким образом, что жидкость, стекающая вниз по гофрам, меняет направление потока, когда встречается с прорезями, до того момента, как достигнет выходной кромки листа (рис. И8а). По сути жидкость должна достичь выходной кромки листа (поз. 44), но, достигая прорези в листе, она меняет свое направление, стекая внутрь кассеты.

Помимо прорезей было предложено исполнение со специальными лентами (рис. И8б), которые также предотвращают унос влаги потоком воздуха.

Важно отметить, что в охладительных установках испарительного типа необходимо, чтобы листы хорошо впитывали влагу, например, с помощью специальных пропиток (феноло-альдегидная смола и др.). Однако на краевых участках, где расположены прорези (рис. И8а, поз. 46 и 50) и полосы (рис. И8б, поз. 54 и 60), наоборот, выгодно, чтобы листы не впитывали жидкость под действием капиллярной силы, поскольку здесь не происходит очистки промывкой жидкостью, так что непрерывное испарение жидкости приведет к образованию осадка, который может закупорить проходы между листами.

Уважаемый читатель!

Как видно из материала, приведенного в этой книге, изобретения Карла Георга Мунтерса, сделанные еще в прошлом веке, актуальны и в наше время, они активно используются в различных сферах деятельности человека от бытового холодильника на кухне до повышения выработки мощности и электроэнергии энергетическими ГТУ.

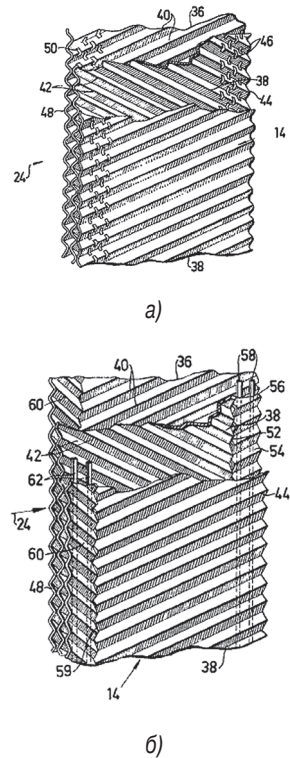


Рис. И8. Испарительная кассета: а) в исполнении с прорезями; б) в исполнении с лентами

Федеральной службой по интеллектуальной собственности РФ 27.12.2012 был опубликован патент RU2471134 С2: «Испарительный охладитель и его применение, а также газотурбинная установка с испарительным охладителем».

Авторами патента являются граждане Сингапура и ФРГ, а патентообладателем — компания Siemens Aktiengesellschaft (ФРГ).

Ниже приводится описание изобретения к патенту.

Изображенный на *рис. И9* испарительный охладитель 2 служит в качестве охладителя со стороны всасывания для охлаждения забираемого из окружающей среды и подводимого здесь не показанным компрессором газовой турбины воздуха.

Для этого он снабжен поточным каналом 6, окруженным закрытым корпусом 4, с впуском 8 воздуха и выпуском 10 воздуха, в котором расположена большая часть охлаждающих элементов 12 или охлаждающих пластин, соответственно объединенных в группы или охлаждающие модули. Плоские охлаждающие элементы 12 ориентированы соответственно вертикально и параллельно направлению воздушного потока 14, создаваемого при работе, и к ним через область крышки корпуса 4 или питающее устройство 16, расположенное на верхней стороне соответствующего охлаждающего элемента 12, с обеих сторон может подводиться вода.

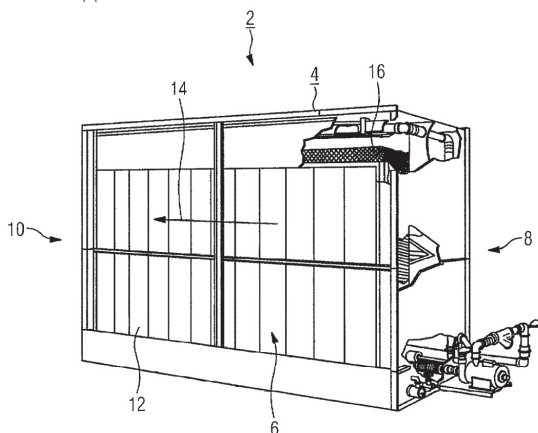


Рис. И9. Испарительный охладитель

Таким образом, при работе как на «передней стороне», так и на «задней стороне» соответствующего охлаждающего элемента образуется стекающая сверху вниз водяная пленка, над которой проходит далее направляемый через проточный канал 6 забираемый воздух. Согласно принципу испарительного охлаждения, при этом испаряется или превращается в пар часть стекающей вниз воды, вследствие чего с одной стороны увеличивается относительная влажность воздушного потока и с другой стороны понижается его температура. Неиспарившаяся часть стекающей вниз через охлаждающие элементы 12

воды собирается в донной области в не показанном подробно здесь сборнике и затем по открытому контуру циркуляции возвращается с помощью здесь не показанного насоса к питающему устройству 16, причем потери жидкости, обусловленные испарением, компенсируются добавкой в контур циркуляции свежей воды, предпочтительно обычной водопроводной воды.

Достижимый эффект охлаждения тем выше, чем суше поступающий в испарительный охладитель 2 (окружающий) воздух. Кроме того, для обеспечения высокого коэффициента полезного действия по возможности должна использоваться в качестве испарительной поверхности вся имеющаяся в распоряжении поверхность охлаждающих элементов 12, причем образующаяся водяная пленка, несмотря на желательное испарение, не должна разрываться ни в одном месте. С другой стороны, подводимое в единицу времени количество воды должно поддерживаться по возможности низким, с тем чтобы от охлаждающих элементов 12 не отрывались никакие водяные капли, которые воздушным потоком могут уноситься в лопастную решетку установленного следом за испарительным охладителем 2 компрессора, где могли бы принести обусловленный эрозией ущерб.

Для приведения в соответствие этих противоречащих друг другу целей в лучшее соответствие друг с другом охлаждающие элементы 12 данного испарительного охладителя 2 снабжены для особенно хорошей смачиваемости охлаждающей жидкостью, в частности водой, золь-гель-покрытием, нанесенным на поверхность основного материала — в данном примере нержавеющей сталь. В частности, при стандартных или нормальных условиях работы, например при температуре впуска воздуха 15 °C и давлении воздуха 1013 мбар, краевой угол в отношении воды достигается меньше 40°, предпочтительно меньше 20° или даже меньше 10°. Гидрофильное покрытие способствует особо равномерному распределению воды на поверхности охлаждающих элементов 12 даже при подаче относительно небольшого количества воды. Образование однородной, относительно тонкой водяной пленки поддерживается даже при неравномерном смачивании и высокой эффективности парообразования или испарения и одновременно уменьшает опасность уноса водяных капель потоком воздуха.

Согласно приведенным выше вариантам осуществления подразумевается, что золь-гель-покрытие может быть образовано, например, целым рядом других методов, с помощью которых целенаправленным образом может быть достигнута гидрофилизация важных для испарения поверхностей охлаждающих элементов 12. К ним относится, в частности, покрытие гидрофильными жидкостными химическими лаками, плазменное покрытие, способ пламенного покрытия, физическое и химическое окисление поверхностей, а также химическое травление и поверхностное травление кислотами и щелочами. Разумеется, выбор особенно подходящего способа гидрофилизации определяется (основным) материалом, из которого изготовлены охлаждающие элементы 12, а также и другими аспектами, как, например, расходы и стоимость,

долговечность покрытия или модифицированных поверхностей в условиях работы и т. д. Особенно предпочтительны способы, для которых не требуется дорогое вакуумное оборудование и отсюда они могут применяться очень гибко и локально, по месту.

Сравнивая техническое решение по этому патенту с *рис. 1.3б (глава 1)* нетрудно прийти к выводу об идентичности технических решений компаний Siemens Aktiengesellschaft и Munters.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ПО ГЛАВАМ

Глава 1

1. Анисимов С. Н., Круговых Д. Е., Молодкин Д. С. Повышение производительности ГТУ при высоких температурах наружного воздуха // Турбины и дизели — 2013. — № 6. — С. 36–39.
2. Агабабов В. С., Жохов В. Л. Технические решения по охлаждению циклового воздуха энергетических ГТУ // Газотурбинные технологии. — 2021. — № 2. — С. 36–40.
3. Беркович А. Л., Полищук В. Г., Рассохин В. А. Под ред. А. Л. Берковича. Впрыск воды в компрессор ГТУ. — СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. — 151 с.
4. T. Komuro, E. Ito, T. Sonoda, Y. Tomita, K. Hidaka, S. Shibutani 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. De Piolene M. Refrigerated Inlet Cooling for New and Retrofit Installations. Gas Turbine World, May–June 1993.
9. Цанаев С. В., Буров В. Д., Земцов А. С., Осыка А. С. Газотурбинные энергетические установки. — М.: МЭИ, 2022. — 428 с.
10. Шахин Н., Акул Х. Системы охлаждения воздуха на входе в газотурбинные установки // Турбины и дизели. — 2011. — № 2. — С. 8–11.

11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Агабабов В. С. Влияние детандер-генераторных агрегатов на тепловую экономичность тепловых электрических станций. Дис... докт. техн. наук. — 2003. — 354 с.
15. 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.
16. Бродянский В. М. Сопоставление эффективности парокompрессионных и воздушных холодильных машин / В. М. Бродянский, Е. Н. Серова, И. М. Калнинь // Холодильная техника. — 1999. — № 11–12.

Глава 2

1. В. Л. Жохов. Охладительные установки испарительного типа энергетических ГТУ. — Рыбинск: Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2023. — 96 с.
2. С. Н. Ленёв. Повышение эффективности парогазовых установок с котлами-утилизаторами и мощными газовыми турбинами. — Дис... канд. техн. наук, 2024.

Глава 3

1. Жохов В. Л., Ленёв С. Н. Результаты эксплуатации КВОУ блоков ПГУ ПАО Мосэнерго и планы по их реализации // Новое в российской электроэнергетике. — 2016. — № 2. — С. 33–43.
2. Жохов В. Л., Ленёв С. Н., Фролов А. В. Первые результаты внедрения охлаждательных установок испарительного типа циклового воздуха энергетических ГТУ в ПАО «Мосэнерго» // Новое в российской электроэнергетике. — 2021. — № 1.-С. 34–45.
3. Siemens industrial turbomachinery AB. Product improvement bulletin. Improvement of air filter efficiency.-2010–03–12.
4. Жохов В. Л., Ленёв С. Н. О необходимости включения требования по определению водостойкости воздушных фильтров в стандарт

- // Новое в российской электроэнергетике. — 2019. — № 2. — С. 16–24.
5. Голов П. В., Жохов В. Л., Ленев С. Н. Новые рекомендации производителя КБОУ компании FAISTAIS для воздушных фильтров // Газотурбинные технологии. — 2017. — № 1. — С. 10–13.
 6. Голов П. В., Жохов В. Л., Ленёв С. Н. Определение водостойкости фильтров-коагуляторов // Газотурбинные технологии. — 2017. — № 3. — С. 26–31.

Глава 4

1. Шахин Н., Акул Х. Системы охлаждения воздуха на входе в газотурбинные установки // Турбины и дизели. — 2011. — № 2. — С. 8–11.
2. Анисимов С. Н., Круговых Д. Е., Молодкин Д. С. Повышение производительности ГТУ при высоких температурах наружного воздуха // Турбины и дизели. — 2013. — № 6. — С. 36–39.
3. Агабабов В. С., Жохов В. Л. Технические решения по охлаждению циклового воздуха энергетических ГТУ // Газотурбинные технологии. — 2021. — № 2. — С. 36–40.
4. Химическая энциклопедия — М.: Советская энциклопедия, 1990. — Т. 2. — С. 145.
5. Жохов В. Л. Влияние фактора воды на эксплуатацию ОУ ИТ энергетических ГТУ // Газотурбинные технологии. — 2021. — № 7. — С. 42–47.

Глава 5

1. Жохов В. Л. Влияние фактора воды на эксплуатацию ОУ ИТ энергетических ГТУ // Газотурбинные технологии. — 2021. — № 7. — С. 42–47.
2. Мартынова Н. К. Фосфаты и их применение для промывки котлов // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». — 2009. — № 3. — С. 27–31.

Глава 6

1. Жохов В. Л., Ленёв 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.
2. Жохов В. Л., Ленёв С. Н. Мониторинг параметров циклового воздуха на всасе энергетических ГТУ с охладительными установками испарительного типа // Новое в российской электроэнергетике. — 2021. — № 2. — С. 6–19.

3. Жохов В. Л., Ленёв С. Н. Система мониторинга параметров циклового воздуха в охлаждающей установке испарительного типа и КВОУ энергетической ГТУ // Газотурбинные технологии. — 2021. — № 5. — С. 38–42.
4. Жохов В. Л. Рейтинг загрязнённости атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ // Газотурбинные технологии. — 2019. — № 2. — С. 42–46.

Глава 7

1. Жохов В. Л. Охладительные установки испарительного типа энергетических ГТУ. — Рыбинск: Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2023. — 96 с.
2. Жохов В. Л. Влияние фактора воды на эксплуатацию ОУ ИТ энергетических ГТУ // Газотурбинные технологии. — 2021. — № 7. — С. 42–47.
3. Жохов В. Л., Ленёв С. Н. Система мониторинга циклового воздуха в охлаждающей на всасе энергетических ГТУ с охлаждательными установками испарительного типа // Новое в российской энергетике. — 2021. — № 2. — С. 6–19.
4. Жохов В. Л. Проблемы импортозамещения запасных частей ремонтного комплекта для охлаждательных установок испарительного типа // Газотурбинные технологии. — 2025. — № 1. — С. 32–37.

Глава 8

1. MuntersAB: сайт. URL: www.munters.com
2. Жохов В. Л. Охладительные установки испарительного типа энергетических ГТУ. — Рыбинск: Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2023. — 96 с.
3. HuTek (Asia) Company Ltd: сайт. URL: www.hutek.com
4. DRI сайт. URL: www.drirotors.com
5. Qingdao Shuangjunli Machinery Co., Ltd сайт. URL: sjlmachine.com
6. ООО «Фильтрационные Технологии». сайт. URL: www.filters.ru
7. Жохов В. Л. Исследование влияния материала и конструктивных особенностей сотового увлажнения на аэродинамические характеристики охлаждательных установок испарительного типа ГТУ // Новое в российской электроэнергетике. — 2025. — № 6. — С. 6–15.
8. ГОСТ 12602–93 (ИСО 8787–86) «Бумага и картон. Определение капиллярной впитываемости. Метод Клемма».
9. ГОСТ 20907–2016. Смолы фенолформальдегидные жидкие. Технические условия.
10. Жохов В. Л. Исследование влияния характеристик и конструктивных особенностей сотового увлажнителя на капиллярную впитываемость

- материла охладительных установок испарительного типа ГТУ // Новое в российской электроэнергетике. — 2025. — № 7. — С. 6–13.
11. ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.
 12. ГОСТ 30630.2.1–2013. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры.
 13. Жохов В. Л., Ленёв С. Н. Защита энергетических ГТУ от двукрылых насекомых и плодов цветения растений. — М.: Мосэнерго, 2020. — 84 с.
 14. Жохов В. Л., Ленёв С. Н. Выбор нештатных противомоскитных сеток для КБОУ энергетических ГТУ // Новое в российской электроэнергетике. — 2021. — № 4. — С. 6–16.
 15. Жохов В. Л., Ленёв С. Н. Защита кассет ОУ ИТ энергетических ГТУ от двукрылых насекомых и плодов цветения растений // Газотурбинные технологии. — 2025. — № 3. — С. 42–46.
 16. Полетаев Н. Л. О распространении пламени тополиным пухом // Пожаробезопасность. — 2010. — Т. 19. — № 6.
 17. <ru.wikipedia.org>
 18. Жохов В. Л. Защита кассет ОУ ИТ от механических повреждений с целью повышения их срока службы и эффективности увлажнения циклового воздуха ГТУ // Газотурбинные технологии. — 2025. — № 5. — С. 30–33.
 19. Жохов В. Л. Проблемы импортозамещения запасных частей ремонтного комплекта для ОУ ИТ ГТУ // Газотурбинные технологии. — 2025. — № 1. — С. 32–37.
 20. Жохов В. Л., Ленёв С. Н. Импортозамещение ремонтного комплекта ОУ ИТ энергетических ГТУ // Газотурбинные технологии. — 2025. — № 2. — С. 30–35.
 21. Жохов В. Л., Ленёв С. Н. Мониторинг параметров циклового воздуха на всасе энергетических ГТУ с охладительными установками испарительного типа // Новое в российской энергетике. — 2021. — № 2. — С. 6–19.

8.1

1. MuntersAB: сайт. URL: www.munters.com
2. Жохов В. Л. Охладительные установки испарительного типа энергетических ГТУ. — Рыбинск: Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2023. — 96 с.
3. HuTek (Asia) Company Ltd: сайт. URL: www.hutek.com
4. DRI сайт. URL: www.drirotors.com

5. Qingdao Shuangjunli Machinery Co., Ltd сайт. URL: sjlmachine.com
6. ООО «Фильтрационные Технологии»: сайт. URL: www.filters.ru

8.2

7. Жохов В. Л. Исследование влияния материала и конструктивных особенностей сотового увлажнителя на аэродинамические характеристики охлаждающих установок испарительного типа ГТУ // Новое в российской электроэнергетике. — 2025. — № 6. — С. 6–15.

8.3

8. ГОСТ 12602–93 (ИСО 8787–86). Бумага и картон. Определение капиллярной впитываемости. Метод Клемма.
9. ГОСТ 20907–2016. Смолы фенолформальдегидные жидкие. Технические условия.
10. Жохов В. Л. Исследование влияния характеристик и конструктивных особенностей сотового увлажнителя на капиллярную впитываемость материала охлаждающих установок испарительного типа ГТУ // Новое в российской электроэнергетике. 2025, № 7, с. 6–13.

8.4.

11. ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнение для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.
12. ГОСТ 30630.2.1–2013. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры.

8.5

13. Жохов В. Л., Ленёв С. Н. Защита энергетических ГТУ от двукрылых насекомых и плодов цветения растений. — М.: Мосэнерго, 2020. — 84 с.
14. Жохов В. Л., Ленёв С. Н. Выбор нештатных противомоскитных сеток для КБОУ энергетических ГТУ // Новое в российской электроэнергетике. — 2021. — № 4. — С. 6–16.
15. Жохов В. Л., Ленёв С. Н. Защита кассет ОУ ИТ энергетических ГТУ от двукрылых насекомых и плодов цветения растений // Газотурбинные технологии. — 2025. — № 3. — С. 42–46.
16. Полетаев Н. Л. О распространении пламени тополиным пухом // Пожаробезопасность. — 2010. — Т. 19. — № 6.

8.6

17. ru.wikipedia.org'
18. Жохов В. Л. Защита кассет ОУ ИТ от механических повреждений с целью повышения их срока службы и эффективности увлажнения циклового воздуха ГТУ // Газотурбинные технологии. 2025. — № 5. — С. 30–33.

8.7

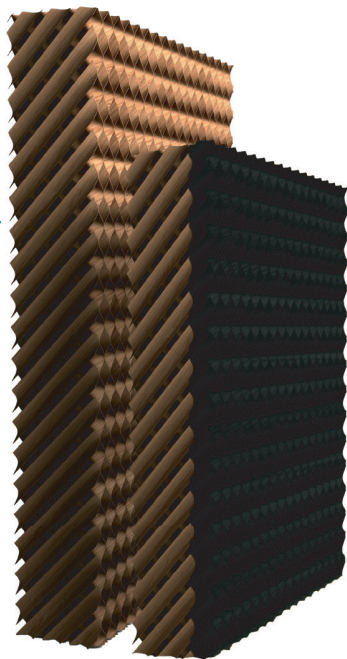
19. Жохов В. Л. Проблемы импортозамещения запасных частей ремонтного комплекта для ОУ ИТ ГТУ // Газотурбинные технологии. — 2025. — № 1. — С. 32–37.
20. Жохов В. Л., Ленёв С. Н. Импортозамещение ремонтного комплекта ОУ ИТ энергетических ГТУ // Газотурбинные технологии. — 2025. — № 2. — С. 30–35.
21. Жохов В. Л., Ленёв С. Н. Мониторинг параметров циклового воздуха на всасе энергетических ГТУ с охладительными установками испарительного типа // Новое в российской энергетике. — 2021. — № 2. — С. 6–19.

HuPad

Материал сотового увлажнения
премиум-класса
для газотурбинного оборудования

HuPad-GT - материал сотового увлажнителя
произведённый специально для охлаждения воздуха
при подаче в газовую турбину.
Поднимает энергоэффективность на новый уровень!

увеличение
выходной
мощности



увеличение
КПД ГТУ

HuPad-GT представляет собой уникальную структуру сот, которая обладает высокой площадью поверхности, эффективными углами взаиморасположения с оптимальными свойствами материала для удержания влаги.

Это позволяет достичь интенсивного охлаждения воздуха, снижая его температуру перед подачей в газовую турбину. Такой подход увеличивает КПД и вырабатываемую мощность турбины до 10%.

HuPad-GT обладает высокой устойчивостью и долговечностью, что делает его идеальным выбором для экстремальных условий работы газовых турбин.

Мы уделяли особое внимание разработке материала, который сохраняет свои свойства в условиях высоких температур и влажности, обеспечивая надежную и эффективную работу турбины на протяжении длительного времени.

ООО «Фильтрационные Технологии»

+7 (495) 909-12-18
gt@filters.ru
www.filters.ru



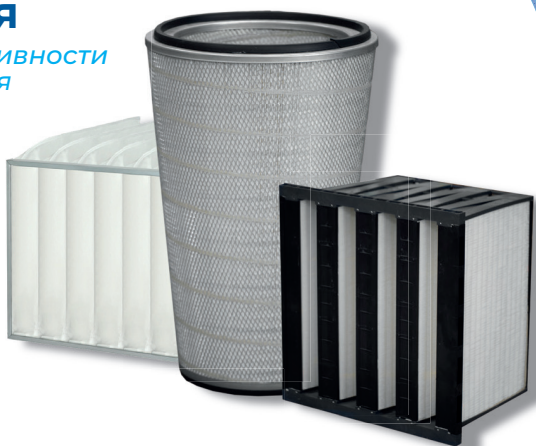


группа компаний
**ВОЗДУШНЫЕ
ФИЛЬТРЫ**

Готовые решения

*по повышению энергоэффективности
газотурбинного оборудования*

Мы производим промышленные воздушные фильтры, которые проходят контроль на собственном лабораторном оборудовании на нашем предприятии, что гарантирует соответствие заявленным требованиям на продукцию.

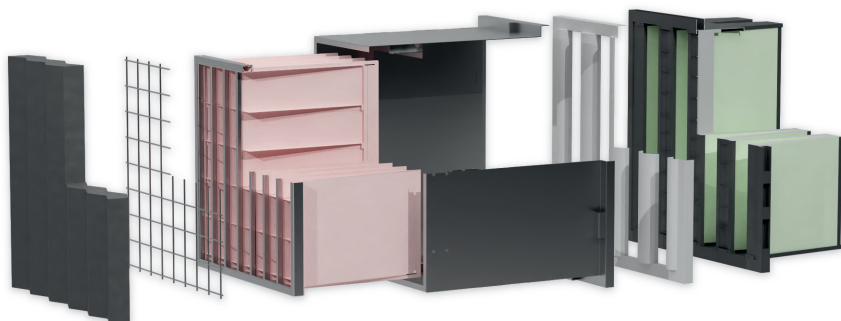


Аудит систем фильтрации

Модернизация
Подбор аналогов



Увеличение КПД ГТУ



Аудит систем фильтрации:

Наша компания проведет полный аудит вашей системы фильтрации, чтобы выявить потенциальные проблемы и улучшить ее эффективность.

Мы анализируем состояние фильтров, системы очистки воздуха и газа, а также другие ключевые компоненты. После аудита мы предоставим вам детальный отчет с рекомендациями по модернизации и оптимизации вашей системы фильтрации.

Модернизация систем фильтрации:

Наша команда специалистов имеет богатый опыт в модернизации систем фильтрации.

Мы поможем вам обновить вашу текущую систему фильтрации с использованием передовых технологий и инновационных материалов.

Модернизация позволит снизить потери давления, улучшить качество очистки воздуха и газа, а также увеличить энергоэффективность вашего оборудования.

Подбор аналогов:

Если вам требуется замена или обновление фильтров или других компонентов системы фильтрации, наша команда поможет вам подобрать оптимальные аналоги, учитывая ваши требования и бюджет.

Наши специалисты помогут вам определить наиболее подходящие альтернативные решения, которые обеспечат эффективную фильтрацию и долговечность вашей системы.

ООО «Фильтрационные Технологии»

+7 (495) 909-12-18
gt@filters.ru
www.filters.ru

Жохов Владимир Леонидович

ОХЛАДИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ТИПА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГТУ

Компьютерная верстка *Касимов Н. Н.*
Корректор *Смирнов В. В.*

Подписано в печать 00.12.25 г. Формат 60×90/16.
Бумага офсетная. Гарнитура NewtonС.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,0.
Тираж 200 экз. Заказ № 0000-25.

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 978-5-6045651-4-8

