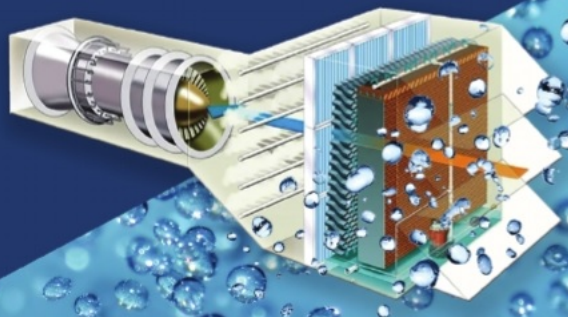
Жохов Владимир Леонидович,
кандидат технологических наук, доцент,
эксперт ПАО «Мосэнерго»

ISBN 978-5-6045651-2-4

Жохов В. Л.

Охладительные установки испарительного типа энергетических ГТУ



Издательский дом
«Газотурбинные технологии»
2023

В. Л. Жохов

Охладительные установки испарительного типа энергетических ГТУ

Рыбинск
ИД «Газотурбинные технологии»
2023

УДК 62-716
ББК 31.26-046
Ж82

Жохов В. Л.

Ж82 Охладительные установки испарительного типа энергетических ГТУ. – Рыбинск, ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2023. – 000 с.

ISBN 978-5-6045651-2-4

В книге представлены результаты эксплуатации и анализа эффективности установок испарительного адиабатического охлаждения воздуха на ТЭЦ ПАО «Мосэнерго», обозначенных автором, как ТЭЦ-1 с ГТУ SGT5-2000E, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 с ГТУ SGT5-4000F.

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 ряд ведущих производителей 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 охладительные установки испарительного типа (ОУ ИТ) были смонтированы в ПАО «Мосэнерго» и успешно эксплуатируются в течение четырех лет.

Книга посвящена анализу эффективности применения ОУ ИТ и главных ограничений при их эксплуатации в Московском регионе.

Автор благодарит сотрудников ПАО «Мосэнерго» за совместное участие в реализации этих проектов: Г. В. Даценко, А. А. Копина, А. В. Фролова и заместителя управляющего директора – главного инженера С. Н. Ленёва. Особую признательность автор высказывает П. В. Леонтьеву, руководителю ООО «Фильтровальные 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 978-5-6045651-2-4

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

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. Технические решения по охлаждению циклового воздуха энергетических ГТУ 4

Глава 2. Оценка эффективности ОУ ИТ энергетической ГТУ SGT5-4000F ПГУ-450 13
2.1. Анализ инвестиционного проекта ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ 13
2.2. Оценка эффективности ОУ ИТ на ПГУ ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» 17

Глава 3. Мониторинг параметров циклового воздуха энергетических ГТУ с ОУ ИТ 22

Глава 4. Влияние фактора воды на эксплуатацию ОУ ИТ энергетических ГТУ 35

Глава 5. Опыт обслуживания и модернизации ОУ ИТ энергетических ГТУ 47

Глава 6. Сравнительный анализ эксплуатации ОУ ИТ энергетических ГТУ в ПАО «Мосэнерго» 62

Глава 7. Анализ результатов эксплуатации кассет ОУ ИТ ГТУ 75

Заключение 82

Краткая историческая справка 83

Список литературы по главам 91

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 падение располагаемой мощности при температурах наружного воздуха выше расчетных. Суть этого явления объясняется тем, 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 расчетной температуре воздуха +15 °С номинальная мощность ГТУ $N_{ном}$ = 280 МВт и $k_{КПД}$ = 1.0. С ростом температуры воздуха *КПД* и располагаемая мощность ГТУ снижаются. При температуре воздуха +32 °С располагаемая мощность ГТУ $N_{расп}$ составит всего 243 МВт, следствием чего будет уменьшение маржинальной прибыли.

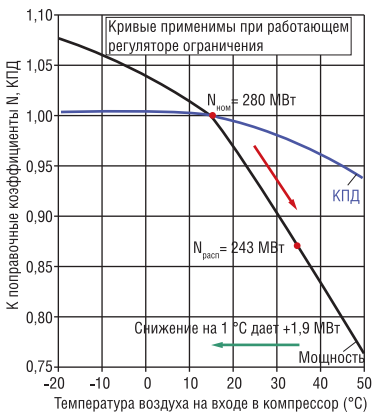


Рис. 1.1. Зависимость выходной мощности и КПД ГТУ Siemens SGT5-4000F от температуры наружного воздуха

Увеличение температуры наружного воздуха с +15 до +25 °С приводит к снижению электрической нагрузки ГТУ M701F4 MHI ориентировочно на 17,10 МВт (1,71 МВт/°С).

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. К техническим решениям в этом направлении относятся охладительные установки:

– испарительного типа с подачей воды перед системой фильтрации комплексного воздухоочистительного устройства (КВОУ) ГТУ (evaporative cooling system) [1, 2];

– с впрыском химически очищенной воды после системы фильтрации КВОУ ГТУ (fogging system) или на входе в осевой компрессор ГТУ (wet compression) [3–9];

– с абсорбционными холодильными машинами (АБХМ, absorption chiller) [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 охладительной установки воздуха испарительного типа (ОУ ИТ) заключается в снижении температуры теплого и сухого атмосферного воздуха, всасываемого компрессором ГТУ за счет его увлажнения водой, подаваемой на пористый материал кассет (*рис. 1.2*).

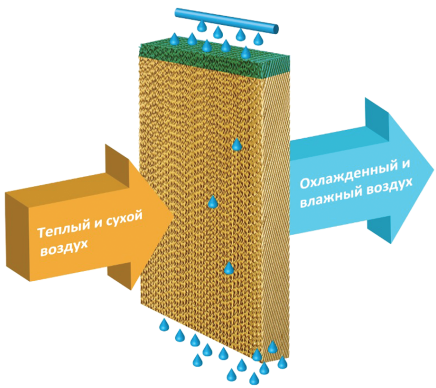


Рис. 1.2. Принцип работы ОУ ИТ (clck.ru/34NvVe)

ОУ ИТ проектируется таким образом, чтобы эффективность насыщения всасываемого воздуха влагой превышала 90 %. Эффективность охлаждения E рассчитывается по формуле:

$$E=\frac{T_{Н}-T_{В}}{T_{Н}-T_{Вт}},$$

где E – эффективность охлаждения; $T_{н}$ – температура наружного воздуха; $T_{в}$ – температура за ОУ ИТ; $T_{вт}$ – температура по влажному термометру.

Процесс охлаждения воздуха в этой установке близок к адиабатическому. Схема, по которой работает система охлаждения воздуха испарительного типа, представлена на *рис. 1.3* [2].

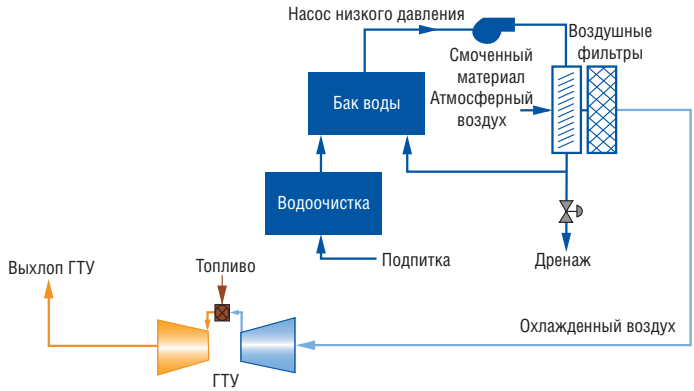


Рис. 1.3. Схема работы ОУ ИТ

ОУ ИТ формируется из нескольких модулей, устанавливаемых перед каждым ярусом и всасом в КВОУ ГТУ. Каждый модуль состоит из двух частей: пористого материала кассет (*рис. 1.2*) и установленного за ними каплеуловителя для предупреждения попадания жидких аэрозолей на воздушные фильтры первой ступени очистки циклового воздуха ГТУ. Пройдя систему очистки в КВОУ, цикловой воздух поступает в осевой компрессор ГТУ. Испарившаяся в матах ОУ ИТ вода пополняется из бака с водой насосом низкого давления. Для пополнения бака и снабжения модулей ОУ ИТ используется химически очищенная вода (ХОВ). Однако в случае удовлетворительного качества воды, минимизирующей отложения на пористом материале матов, допускается использовать водопроводную воду или воду из артезианских скважин и колодцев.

Преимуществами данной системы являются:

– относительно низкие капитальные затраты;

– относительно небольшие сроки монтажа и ввода в эксплуатацию;

– низкие затраты на ремонт и обслуживание системы;

– возможность работы не на ХОВ;

– отсутствие негативного воздействия на проточную часть осевого компрессора ГТУ;

– низкое потребление электроэнергии на собственные нужды.

В качестве *недостатков* системы можно отметить:

– ограниченную глубину охлаждения воздуха, зависящую от его влажности;

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

– повреждаемость кассет орошения.

Система охлаждения воздуха с впрыском ХОВ

Принцип ее работы заключается в распыле деминерализованной воды через специальные форсунки, обеспечивающие генерирование капель необходимого размера (12–20 мкм) и образование тумана в потоке воздуха (*рис. 1.4*).

Подача ХОВ в форсунки осуществляется насосом высокого давления (около15 МПа) с регулируемой частой вращения, что позволяет выполнять ступенчатую подачу воды в зависимости параметров воздуха.

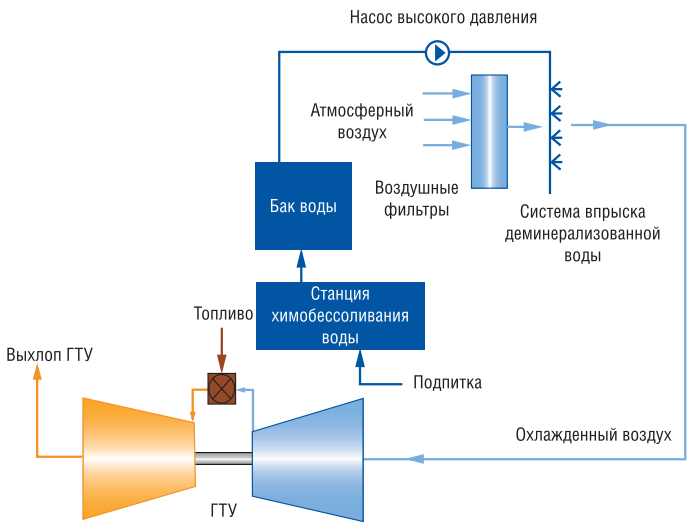
По месту подачи деминерализованной воды различают два способа: за системой фильтрации воздуха КВОУ (*рис. 1.5*) и перед осевым компрессором ГТУ.

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

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

Рис. 1.4. Распыл ХОВ через форсунки [2]

Рис. 1.5. Система подачи ХОВ за фильтрами КВОУ ГТУ [2]



а)

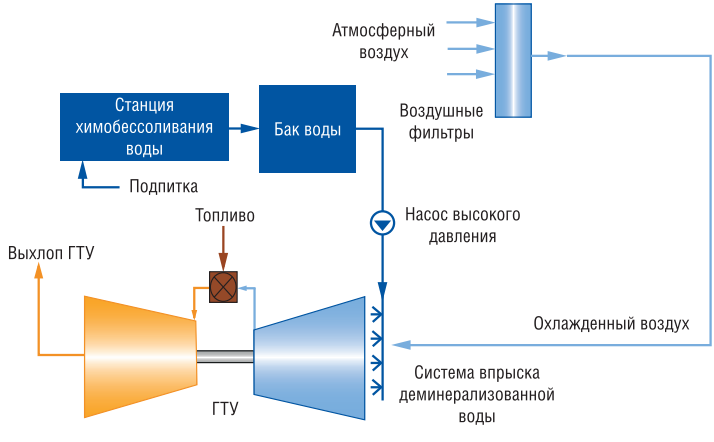


Рис. 1.6. Принципиальная схема системы охлаждения воздуха с впрыском ХОВ: а) после системы фильтрации КВОУ; б) на входе в осевой компрессор ГТУ [2]

К преимуществам данной системы относятся:

– относительно низкие капитальные затраты;

– относительно небольшие сроки монтажа 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 этой системы являются:

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

– сокращение эмиссии NO_x и CO_2 в атмосферу.

Недостатки системы:

– относительно высокие капитальные затраты;

– модернизация лопаток и проточной части компрессора ГТУ;
– замена форсунок в среднем через 2–3 года эксплуатации;
– контроль точности отстройки распыла воды от образования капель;
– более активные эрозионные процессы в проточной части ГТУ;
– уменьшение *КПД* комбинированного цикла из-за снижения температуры уходящих газов ГТУ.

Система охлаждения воздуха с бромисто-литиевыми холодильными машинами

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. 1.7*.

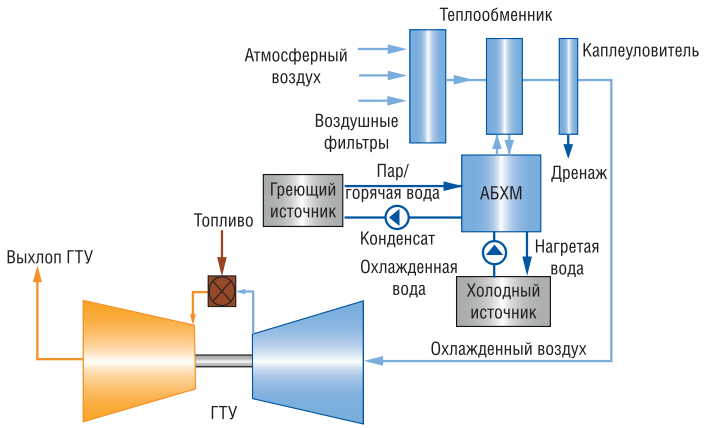


Рис. 1.7. Принципиальная схема системы охлаждения циклового воздуха с использованием АБХМ [2]

АБХМ работает по замкнутому контуру в составе абсорбера, генератора, конденсатора и испарителя. Рабочее тело холодильной машины – водный раствор бромистого лития. Под воздействием тепла горячей воды или пара в генераторе из раствора бромистого лития выделяются пары воды (хладагента), которые переносятся в конденсатор. Водяной пар конденсируется, отдавая тепло воде охлаждающего контура. Охлажденная вода поступает в испаритель, где при низком давлении закипает при температуре +6 °С и забирает тепло от охлаждаемого контура. Оставшийся концентрированный раствор бромида лития через растворный теплообменник переходит в абсорбер. Для улучшения абсорбции раствор разбрызгивается форсунками и поглощает водяной пар из испарителя. Процесс абсорбции связан с выделением теплоты, которая отводится охлаждающим контуром в абсорбере. Полученный раствор воды и бромида лития перекачивается в генератор через регулятор/теплообменник, и цикл повторяется снова.

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. 1.8*. Система охлаждения имеет промежуточный контур, связывающий детандер-генераторный агрегат (ДГА) с КВОУ ГТУ.

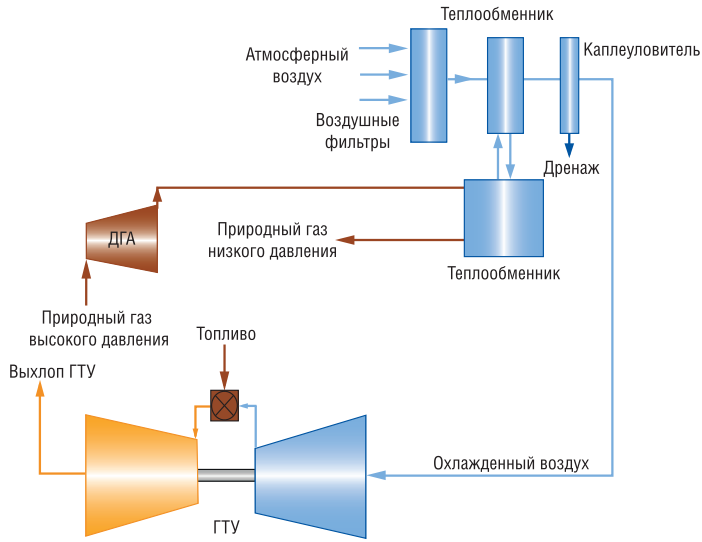


Рис. 1.8. Принципиальная схема системы охлаждения циклового воздуха с помощью турбодетандеров [2]

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 оребрение. Теплообменные поверхности предпочтительнее устанавливать внутри КВОУ.

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 [15]. Принципиальная схема системы охлаждения циклового воздуха с использованием ПКТТ приведена на *рис. 1.9*.

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. 1.10* в T-S-диаграмме.

Установка работает следующим образом. Рабочее тело (хладагент), поступающее в испаритель 1 (*рис. 1.9*), находится в основном в жидком состоянии (точка 1 на *рис. 1.10*). В испарителе 1 к рабочему телу подводится атмосферный воздух, в результате чего в нем происходит парообразование хладагента (процесс 1–2 на *рис. 1.10*), после чего хладагент поступает в парокомпрессор 2, приводом которого служит электродвигатель 3 (*рис. 1.9*). В парокомпрессоре 2 хладагент сжимается от давления P_1 до давления P_2 (процесс 2–3),

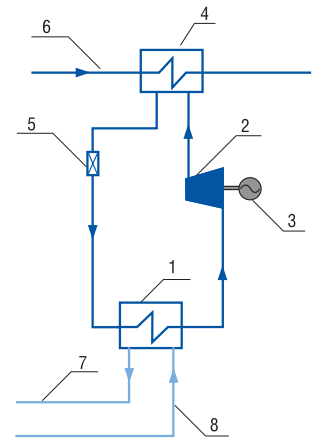


Рис. 1.9. Принципиальная схема парокомпрессионного термотрансформатора:
1 – испаритель;
2 – парокомпрессор;
3 – электродвигатель;
4 – конденсатор;
5 – дроссель;
6 – нагреваемая среда;
7 – линия подачи холодного воздуха к КВОУ;
8 – линия подачи атмосферного воздуха к испарителю [2]

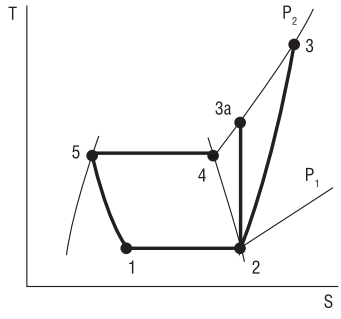


Рис. 1.10. Процессы в парокомпрессионном термотрансформаторе [2]

в результате его температура повышается с температуры, соответствующей точкам 1 и 2, до температуры, соответствующей точке 3 (*рис. 1.10*). Из парокомпрессора 2 хладагент направляется в конденсатор 4 (*рис. 1.9*), где его температура сначала снижается до температуры конденсации при давлении P_2 (точка 4), после чего хладагент конденсируется (процесс 4–5, *рис. 1.10*), отдавая теплоту нагреваемой среде 6 (*рис. 1.9*). После конденсатора 6 хладагент направляется в дроссель 5, где поток дросселируется до давления P_1, и цикл замыкается (*рис. 1.9*). 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 три группы: высокотемпературные (выше –10 °С), умеренные (ниже –10 °С) и низкотемпературные (ниже –50 °С). 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:

– широкий круг требований, предъявляемых к хладагентам: низкая температура кипения при давлении выше атмосферного; умеренные 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.

Выводы:

Каждое из рассмотренных технических решений имеет свои преимущества и недостатки, поэтому оптимальная система охлаждения циклового воздуха энергетических ГТУ должна выбираться в результате тщательного анализа климатических условий региона, технико-экономического анализа оборудования, расчета финансовой модели 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

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, производители КВОУ ГТУ.

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

Для ознакомления с этими технологиями на практике сотрудники ПАО «Мосэнерго» посетили ООО «ЛУКОЙЛ-Астраханьэнерго», энергоблоки ПГУ-110 и ПГУ-235 с установкой абсорбционных холодильных машин (АБХМ) для ГТУ LM6000PF Sprint производства General Electric и ООО «ЛУКОЙЛ-Кубаньэнерго», 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» ведущими организациями, и посещения нашими сотрудниками действующих энергоблоков с различными системами снижения температуры циклового воздуха ГТУ было принято решение остановиться на охладительной установке воздуха испарительного типа

(ОУ ИТ). Такой выбор был обусловлен 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».

Факторы, учитываемые при анализе применения ОУ ИТ ГТУ ***Таблица 2.1***

Экономические	Технические и климатические
Капитальные затраты (приобретение, монтаж, введение в эксплуатацию). Эксплуатационные затраты (рост затрат на топливо, стоимость воды для ОУ ИТ и ее отвода, 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).	Температура и относительная влажность воздуха Москвы. Оценка периода использования ОУ ИТ в течение года. Время и трудозатраты на монтаж, демонтаж, ремонт. Возможность использования химической 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 внедрения ОУ ИТ на ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» была проанализирована его чувствительность, под которой 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, 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. Какую сумму 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 в проект инвестиций 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 с мая по сентябрь, когда температура воздуха устанавливается выше +12 °С, а относительная влажность RH ≤ 80 %. Расчетное среднемесячное (за это время) снижение ограничений мощности блока ПГУ-420 составило 8,9 МВт, с учетом риска снижения эффекта по температурному фактору для расчетного моделирования принято 7 МВт. В результате анализа чувствительности инвестиционного проекта было установлено, что в случае использования ХОВ (химической 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. Исходя из этого было принято решение 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. Там ОУ ИТ эксплуатируется семь месяцев с апреля по октябрь. За этот время средняя величина прироста мощности ПГУ фиксируется на уровне 7,15 МВт·ч. В ценах 2014 г. дисконтированный срок окупаемости проекта составил 4 года.

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

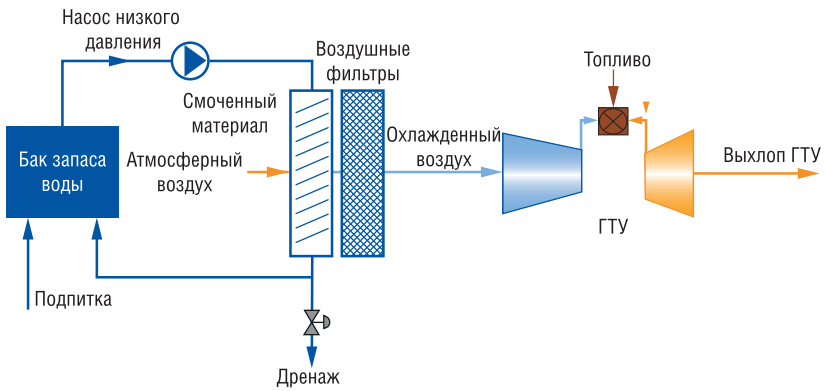


Рис. 2.1. Принципиальная схема работы ОУ ИТ на ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» [1]

В *табл. 2.2* представлены технические характеристики ОУ ИТ, установленные на ТЭЦ с ГТУ Siemens SGT5-4000F.

Технические характеристики ОУ ИТ ГТУ ***Таблица 2.2***

Психрометрическая эффективность, %	91,0
Максимальное аэродинамическое сопротивление на испарительном охладителе (смачиваемый материал + каплеуловитель), Па	120,0
Максимальное потребление воды (с учетом удаления в канализацию), м^3/ч	24,0
Максимальное испарение, м^3/ч	20,0
Максимальный рабочий вес, кг	60 000
Мощность каждого из двух насосов, кВт	13,5
Напряжение, В	380
Макс. рабочий вес насосной рамы, кг	12 000

Корректировка окупаемости инвестиционного проекта была выполнена после первого сезона эксплуатации. По данным выгрузки архива параметров из системы SPPA T-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 порядка 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 установки в эксплуатацию, в результате чего она проработала всего 1315 часов из 3600 запланированных.

► Низкая температура наружного воздуха во время работы установки. По данным Гидрометцентра, июль в Москве является самым теплым и самым дождливым месяцем. Однако в 2019 году среднемесячная температура наружного воздуха в июле составила всего 16,8 °С, что на 2,6 °С ниже средней температуры за всю историю наблюдений. Среднестатистическое количество дождливых дней в июле равно 12, но в 2019 году их 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 пессимистичному сценарию. Показатель NPV (*чистая приведенная стоимость*) проекта остается положительным, но *дисконтированный срок окупаемости DPP* увеличится до 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 *рис. 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.

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

Рис. 2.2. Общий вид ОУ ИТ в помещении КВОУ на блоке ПГУ-450 ТЭЦ-3

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

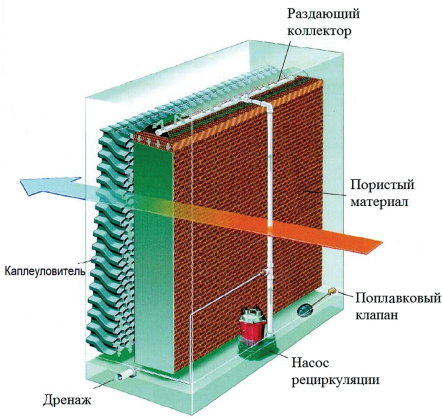


Рис. 2.3. Модуль ОУ ИТ [1]

В зависимости от температуры и относительной влажности атмосферного воздуха водопроводная вода с помощью одного из двух насосов 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*).

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 ºС 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 °С и относительной влажности 51 % температура воздуха на входе в компрессор снизилась на 4 ºС до 14,5 °С, что привело к увеличению мощ-

ности энергоблока на 11 МВт для выдерживания графика нагрузки энергосистемы.

В рамках проведения испытаний по программе Системного оператора (услуги НПРЧ – нормированное первичное регулирование частоты) 20.06.2019 при температуре наружного воздуха 29 °С и относительной влажности воздуха RH = 24 % температура за ОУ ИТ снижалась на 9,7 °С, 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 *рис. 2.4*. На фронтовой части матов видны отложения белого цвета.

После окончания сезона эксплуатации ОУ ИТ на ТЭЦ-3 (при среднесуточной температуры воздуха не выше +12 ºС) 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 *рис. 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 дис-

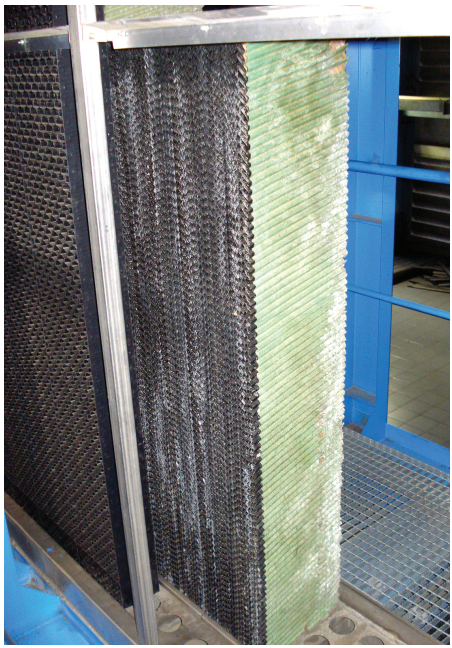


Рис. 2.4. Состояние кассет ОУ ИТ

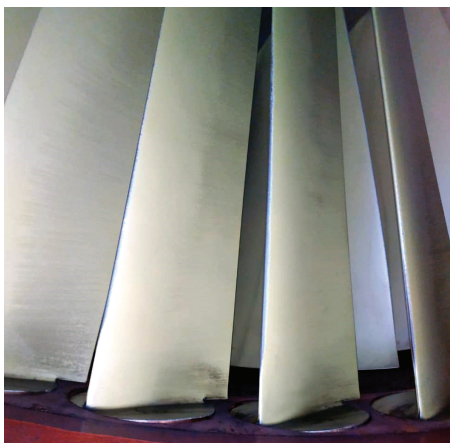


Рис. 2.5. Состояние лопаток ВНА ГТУ

петчерскому графику нагрузок ПГУ с целью определения эффективности ОУ ИТ при различной температуре и относительной влажности наружного воздуха.

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 между располагаемой мощностью при параметрах воздуха после испарительных охладителей и располагаемой мощностью при параметрах наружного воздуха (до испарительной установки). Расчетное увеличение мощности ГТУ для $N_э$ = 276 МВт и эффективности охлаждения E = 0,9 при работе ОУ ИТ представлены в *табл. 2.3.*

Расчетное увеличение мощности ГТУ (МВт) ***Таблица 2.3***

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

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]:

$$\Delta t = t_н - t_в,$$

где:

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

$t_н$ – температура воздуха до ОУ ИТ (температура наружного воздуха), °С;

$t_в$ – температура воздуха после ОУ ИТ, °С.

Определение температуры воздуха по мокрому термометру производится по h-d-диаграмме для адиабатического охлаждения (h = 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.

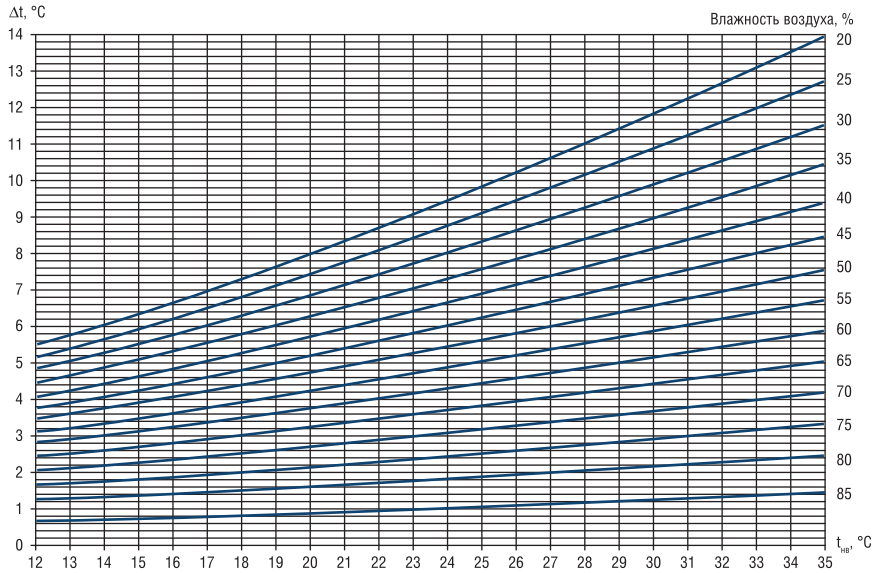


Рис. 2.6. Номограмма охлаждения воздуха в ОУ ИТ ГТУ в зависимости от температуры и относительной влажности атмосферного воздуха (Копин А. А.)

При температуре атмосферного воздуха 20 °С и относительной влажности 50 % фактическое снижение температуры воздуха на входе в компрессор составляет 5,2 °С. Это приводит к реальному увеличению мощности ГТУ на 10 МВт, а блока ПГУ-450 на 11 МВт.

Вывод:

Основной прирост мощности блока ПГУ при работе ОУ ИТ происходит за счет увеличения мощности ГТУ. Влияние ПТ на мощность ограничивается 10 %.

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» охладительных 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*).

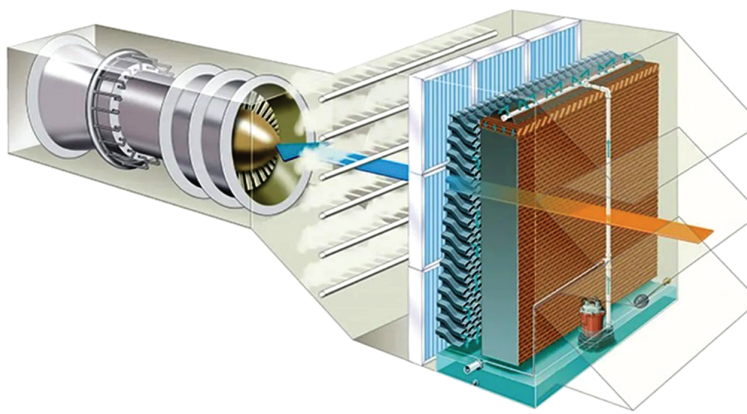


Рис. 3.1. Схема охлаждения циклового воздуха ГТУ с помощью ОУ ИТ (clck.ru/34NvF5)

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.

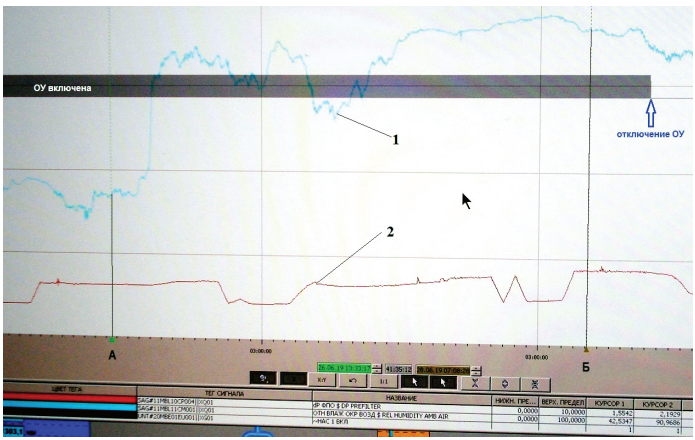


Рис. 3.2. Тренды изменения:
1 – относительной влажности воздуха окружающей среды;
2 – перепада давления на фильтрах тонкой очистки класса F8 при работающей ОУ ИТ

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 Н 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 КВОУ 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 КВОУ на 50 Па ведет в среднем к недовыработке ГТУ 0,1 % электроэнергии (в нашем случае 0,12 %). Для поддержания диспетчерского графика выработки электроэнергии операторы БЩУ вынуждены будут повышать расход топливного газа для ГТУ, что неминуемо ведет к финансовым потерям.

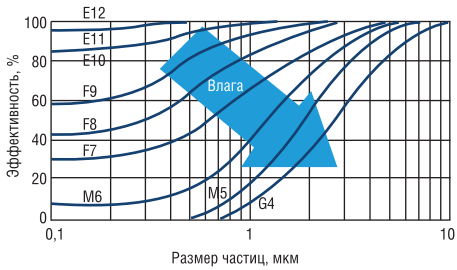


Рис. 3.3. Влияние атмосферной влаги на эффективность воздушных фильтров [1]

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 КВОУ, приведенные в бюллетене компании Siemens AB «Improvement of air filter efficiency»[3].

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.

Оценка проникновения пыли через систему фильтрации с различным сочетанием классов очистки по ступеням ***Таблица 3.1***

Размер частиц, мкм	Кол-во частиц в воздухе на промышленной территории, 1/м³	Система фильтрации G4+G4+F8		Система фильтрации G4+F7+E10	
		Начальная эффективность, %	Кол-во проникающих частиц, 1/м³	Начальная эффективность, %	Кол-во проникающих частиц, 1/м³
0,3–0,5	20 000 000	88,20	2 265 600	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

Для снижения влияния влажности воздуха на работу воздушных фильтров КВОУ и ГТУ на первых ступенях систем очистки воздуха устанавливают 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 (*рис. 3.4*).

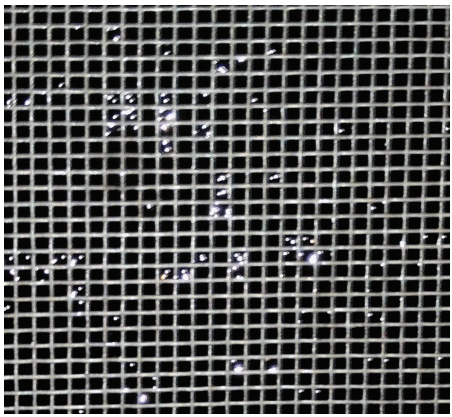


Рис. 3.4. Капли влаги на защитной сетке фильтров ФТО F8 при работающей ОУ ИТ

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» (*рис. 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.

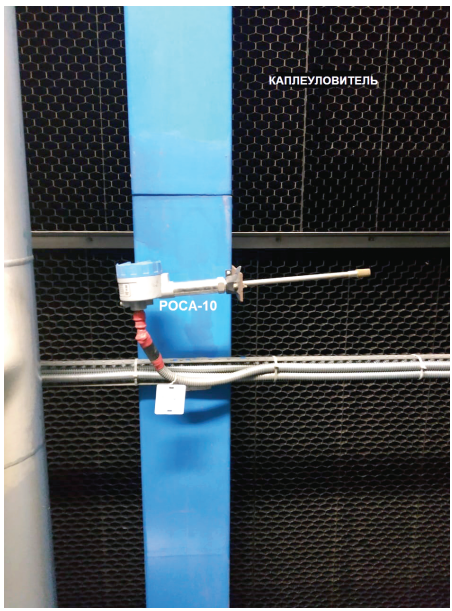


Рис. 3.5. Измерительный преобразователь температуры и влажности воздуха за каплеуловителем ОУ ИТ ГТУ

Как меняется влажность рабочего тела вверх 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.

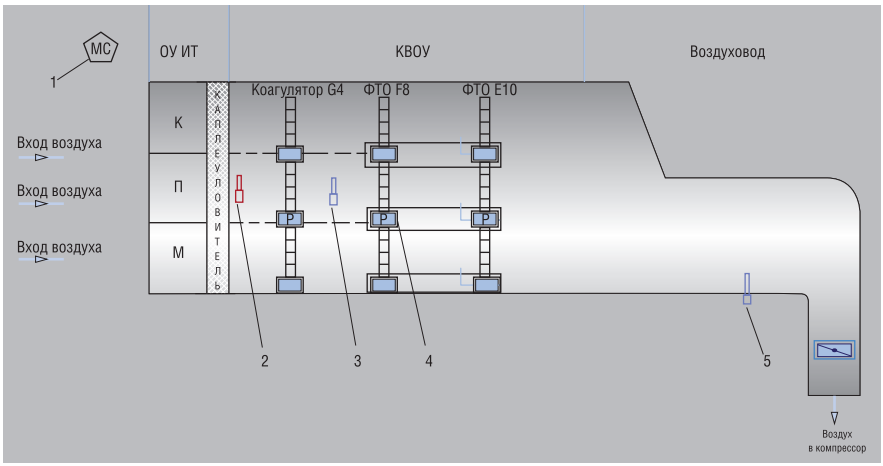


Рис. 3.6. Схема расположения приборов «РОСА-10» в ВЗТ ГТУ ТЭЦ-3: 1 – метеостанция на КВОУ; 2 – штатный прибор за ОУ ИТ; 3 – вновь установленный прибор за фильтрами-коагуляторами КВОУ; 4 – датчики давления; 5 – вновь установленный прибор в воздуховоде к ГТУ; КПМ – кассеты пористого материала

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 *рис. 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 каплеуловителей 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 превалирующее влияние пониженной температуры воздуха.

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.

а)

б)

Рис. 3.7. Измерительный преобразователь температуры и влажности воздуха «РОСА-10»: а) за фильтрами-коагуляторами класса G4 в КВОУ; б) в воздуховоде к ГТУ

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.

Тренды изменения температуры и относительной влажности воздуха от входа в ОУ ИТ до всаса в осевой компрессор ГТУ можно описать с помощью

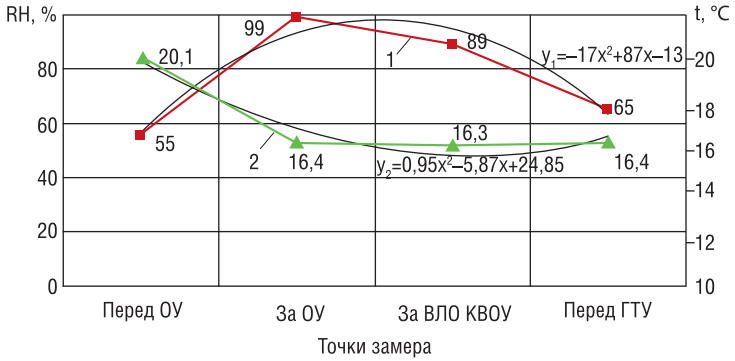


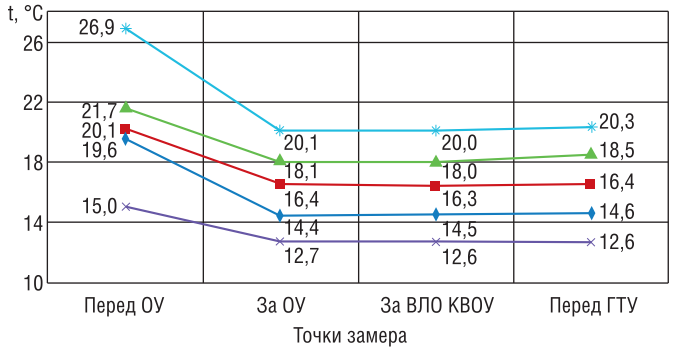
Рис. 3.8. Изменение относительной влажности (1) и температуры воздуха (2) по проточной части ВЗТ ГТУ ТЭЦ-3

полиномных 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 °С. Из графиков следует, что чем выше температура наружного воздуха, тем выше эффективность его охлаждения в ОУ ИТ.

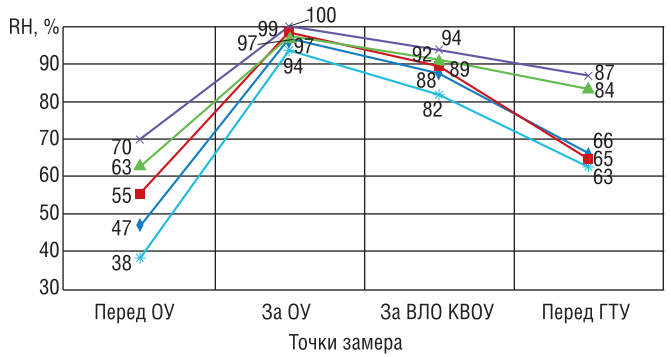
Обращает на себя внимание тот факт, что температура циклового воздуха на всасе в осевой компрессор повышается на 0,2...0,4 °С по сравнению со значениями после ОУ ИТ. Это явление на данном этапе исследований можно объяснить небольшими присосами теплого воздуха в воздуховод из машинного цеха.

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



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

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 29461-2020 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.

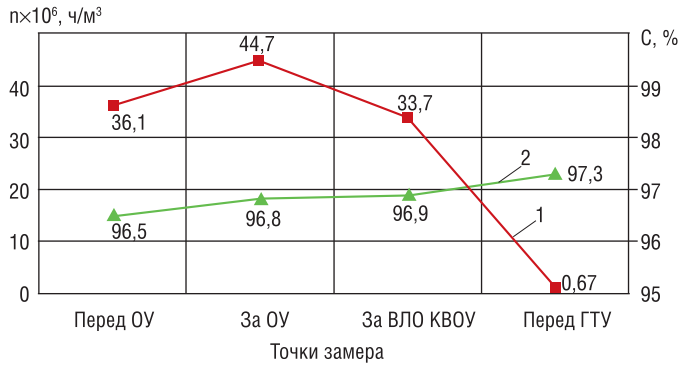


Рис. 3.10. Изменение общего количества частиц и процентное отношение мелкодисперсных аэрозолей по проточной части ВЗТ ГТУ ТЭЦ-3:
1 – общее количество частиц; 2 – процентное отношение мелкодисперсных аэрозолей

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 (*рис. 3.11*).

Рис. 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.

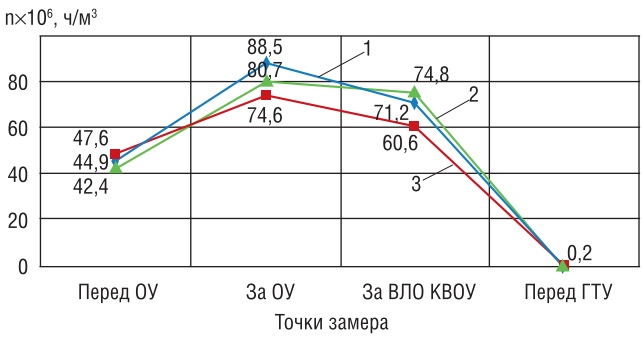


Рис. 3.12. Изменение количества частиц на третьем ярусе по всем всасам ВЗТ ТЭЦ-2 при работающей ОУ ИТ 30.07.2020: 1 – центральный всас; 2 – правый всас; 3 – левый всас

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 вет-

ров». 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.

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

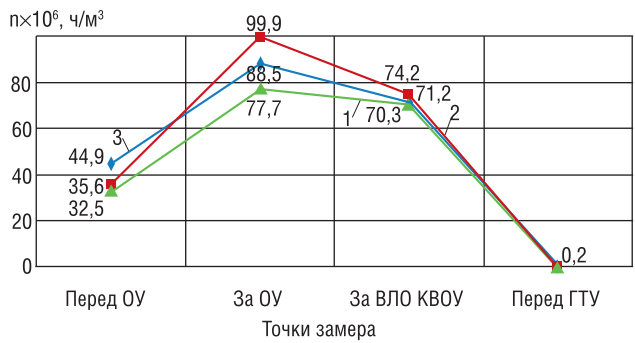


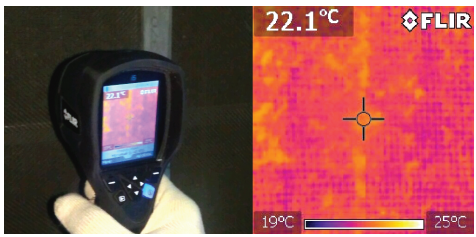
Рис. 3.13. Изменение общего количества частиц по трем ярусам центрального всаса ВЗТ при работающей ОУ ИТ 30.07.2020: 1 – нижний ярус; 2 – средний ярус; 3 – верхний ярус

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.

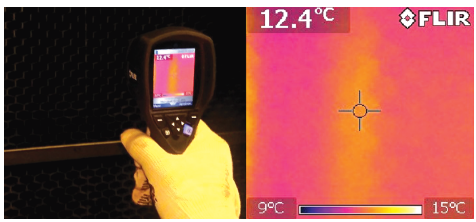
Для повышения эффективности фильтров-коагуляторов КВОУ ГТУ по очистке влажного воздуха от аэрозолей за ОУ ИТ целесообразно использовать фильтр-элементы, изготовленные по новым технологиям. Широко известны и хорошо себя зарекомендовали как за рубежом, так и на отечественных ТЭЦ в ТГК-1 в Санкт-Петербурге 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 *рис. 3.14* представлены термограммы во входном сечении пористого материала TURBOdek и за каплеуловителями влаги при работающей ОУ ИТ ТЭЦ-3.

Как видно на *рис. 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 рис. 3.14б* розовый цвет) показывает практически нулевой градиент температуры по всей измеряемой площади.



а)



б)

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

Выводы:

– в ПАО «Мосэнерго» впервые разработана и внедрена система мониторинга работы ОУ ИТ, изменения температуры, относительной влажности и загрязненности воздуха по проточной части ВЗТ энергетических ГТУ при работающей ОУ ИТ, влияния влажности воздуха на перепад давления и срок службы фильтров КВОУ 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 КВОУ 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 КВОУ 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 КВОУ 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. Одной из первых ОУ ИТ, установленных на энергетическом объекте, стала Краснодарская 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 (*рис. 4.1*). Отверстия диаметром 3 мм расположены в верхней части труб орошения по дуге 60º (*рис. 4.2*) на расстоянии 50 мм друг от друга (*рис. 4.3*).

Такое расположение отверстий обусловлено желанием производителя избежать чрезмерного износа кассет под воздействием струй воды. На *рис. 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.

ОУ ИТ оснащены основным и резервным насосами подачи воды в трубопроводы орошения кассет. Для правильной циркуляции воды насос и бак

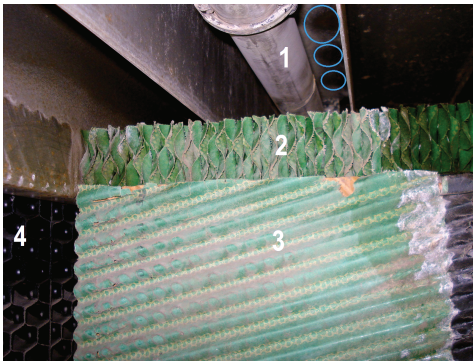


Рис. 4.1. Элементы системы орошения ОУ ИТ: 1 – труба орошения; 2 – водораспределительная кассета; 3 – испарительная кассета; 4 – каплеуловитель

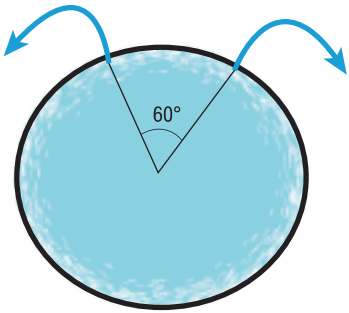


Рис. 4.2. Расположение отверстий на трубах орошения

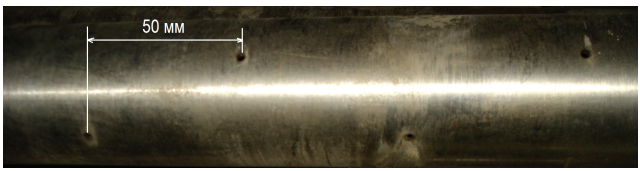


Рис. 4.3. Расстояние между отверстиями на трубах орошения ОУ ИТ ГТУ

хранения воды устанавливаются как часть рамной конструкции охладителя (*рис. 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 блочного щита управления (БЩУ) 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 °С), клапаны открываются (перекрывается подача свежей воды) и вода сливается из системы. При повышении температуры до +10 °С 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.

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 (*рис. 4.6*).

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

Все установленные ОУ ИТ имеют конструктивные отличия 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

а)

б)

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

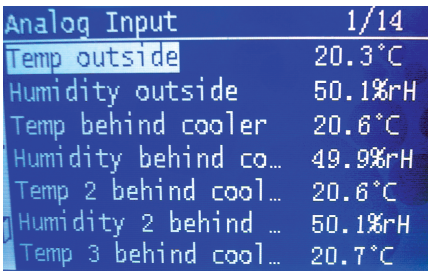


Рис. 4.5. Показания местного щита управления перед пуском ОУ ИТ

Рис. 4.6. Сток воды с кассет в поддоны

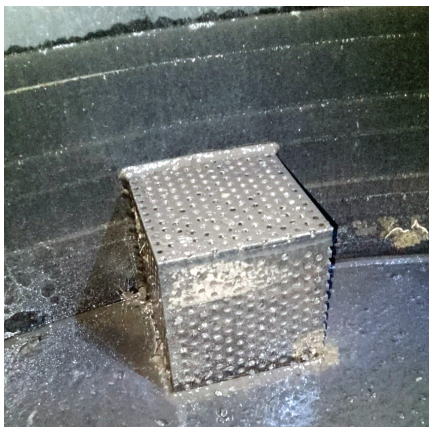


Рис. 4.7. Сетчатый фильтр в блоке фильтров бака (фото изнутри бака)

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 (*рис. 4.8*).

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 цир-

куляционной 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 (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.

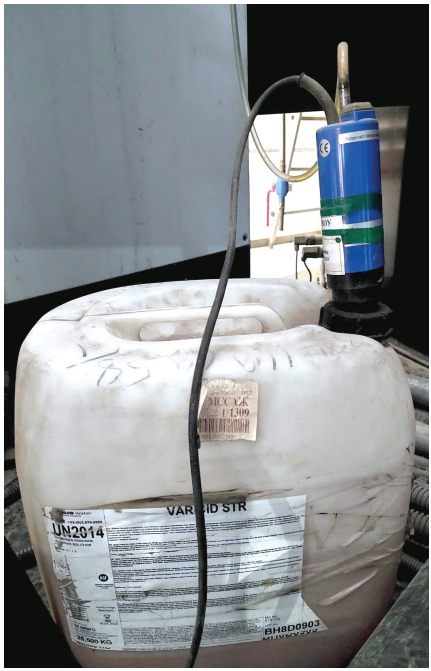


Рис. 4.8. Бачок с биоцидом и насосом

Классификация воды по степени кислотности *(clck.ru/34NxCa)* ***Таблица 4.1***

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 (°Ж). 1 °Ж соответствует концентрации щелочноземельного элемента, численно равной 1/2 его миллимоля на литр (1 °Ж = 1 мг-экв/л). По величине общей жесткости различают воду *мягкую* (до 2 °Ж), *средней жесткости* (2–10 °Ж) и *жёсткую* (более 10 °Ж). Однако в зависимости от назначения ее применения (аквариумы), встречается более детальная градация жесткости воды (*табл. 4.2*).

Детальная классификация воды по жесткости *(clck.ru/34NxtJ)* ***Таблица 4.2***

Очень мягкая	0–4°
Мягкая	5–8°
Средней жесткости	9–16°
Жесткая	17–32°
Очень жесткая	33° 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 °Ж, в мае – 0,5 °Ж [4]. В подземных водах жесткость обычно выше (до 8–10, реже до 15–20 °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/дм^3. По согласованию с органами Роспотребнадзора для водопровода, подающего воду без соответствующей обработки (например, из артезианских скважин), допускается увеличение минерализации до 1500 мг/дм^3).

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 целесообразнее 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.

Характеристики воды из артезианских скважин на ТЭЦ в ЮФО [5] ***Таблица 4.3***

Величина	Номер скважины					
	1	2	3	4	5	6
pH	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 pH 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] ***Таблица 4.4***

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

Несмотря на то что по водородному показателю pH 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 (*рис. 4.9*).

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

Рис. 4.9. Отложения на испарительных кассетах ОУ ИТ в ЮФО

Образцы отложений в трубах орошения и дренажа ОУ ИТ были тщательно исследованы несколькими методами. Анализы отложений, выполненные в химической лаборатории методом рентгено-флуоресцентной спектрометрии 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. 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.

а) *б)*

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

Результаты анализов отложений в трубе орошения ***Таблица 4.5***

Метод анализа	Компонент	Массовая доля, %
ГОСТ 26449.4-85	Потери/привес при прокаливании	42,55/–
Рентгено-флуоресцентная спектрометрия	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

Результаты анализов отложений в трубе дренажа ***Таблица 4.6***

Метод анализа	Компонент	Массовая доля, %
ГОСТ 26449.4-85	Потери/привес при прокаливании	46,62/–
Рентгено-флуоресцентная спектрометрия	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 (*рис. 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 (*рис. 4.12*).

На *рис. 4.13* показана структура образца отложений при различном увеличении на ЭСМ. На *рис. 4.14а* (образец № 1 – отложения в трубе орошения) и на *рис. 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.

Рис. 4.11. Подготовка образца отложений для сканирования на ЭСМ

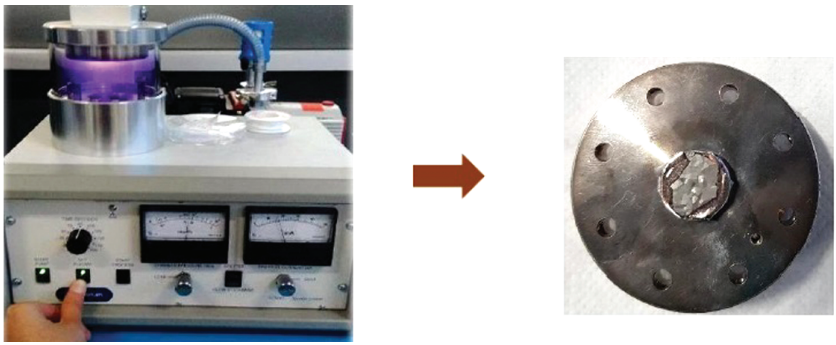


Рис. 4.12. Сканирование образца отложений на ЭСМ

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 Ca. Различия в результатах исследований по количественному составу Ca обусловлены тем, что значения, полученные на сканирующем электронном микроскопе, представлены в элементном составе, а по методу рентгено-флуоресцентной спектрометрии – в окислах. Кроме того, при прокаливании образцов были определенные потери массы отложений (*табл. 4.5* и *4.6*).

В процессе подготовки инвестиционных проектов зачастую принимаются решения использовать для ОУ ИТ водопроводную воду. При этом не учитывается опыт эксплуатации других энергетических объектов, столкнувшихся

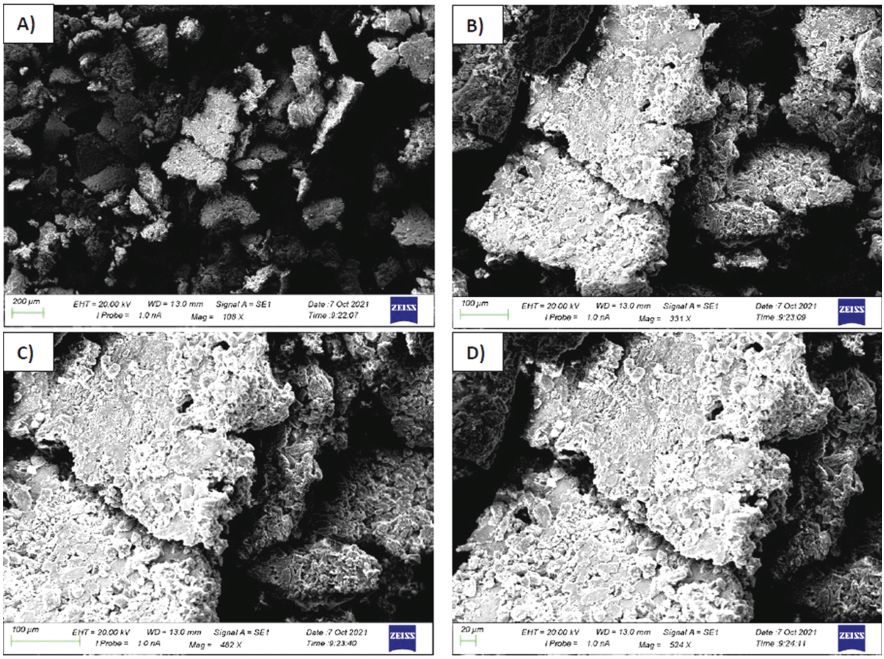


Рис. 4.13. Структура образца отложений при различном увеличении на ЭСМ

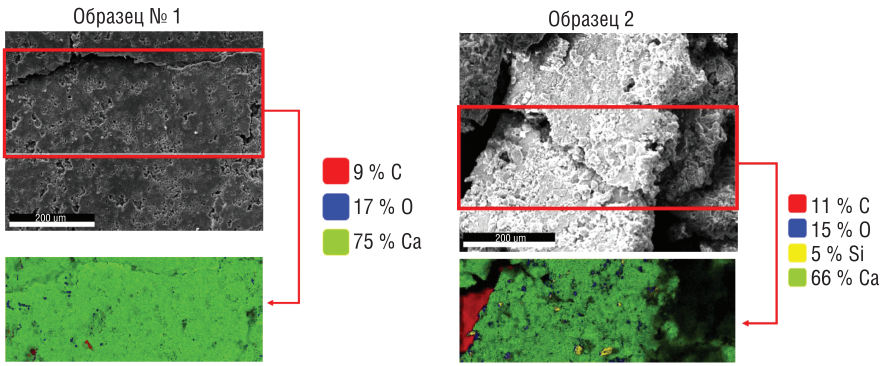


Рис. 4.14. Элементный химический состав отложений в трубе: а) орошения, б) дренажа

Сравнение характеристик водопроводной воды в некоторых городах [5] ***Таблица 4.7***

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

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.

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.

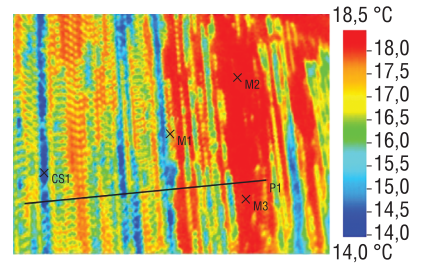
Нет безнадежных больных.
Есть только безнадежные врачи.

Ибн Сина

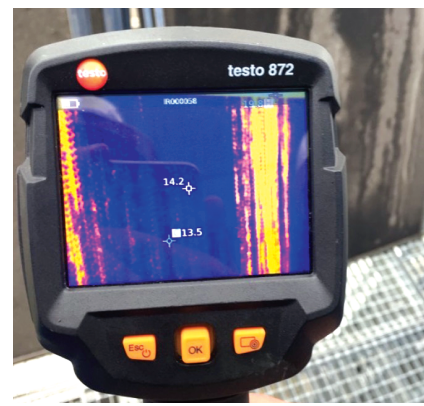
ГЛАВА 5.
Опыт обслуживания и модернизации ОУ ИТ энергетических ГТУ

Опыт эксплуатации охладительных установок испарительного типа энергетических ГТУ показывает, что использование воды с повышенной жесткостью и высокой общей минерализацией в качестве цикловой приводит к образованию отложений на кассетах и в водопроводах [1]. В результате этого отверстия в трубах орошения дросселируются отложениями и не обеспечивают расчетного поступления воды на испарительные кассеты ОУ ИТ. Это 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 *рис. 5.1* для сравнения представлены термограммы поверхности испарительных кассет ОУ ИТ при дискретном и наиболее полном орошении водой.

Синим цветом обозначена площадь кассет (с пониженной темпера-



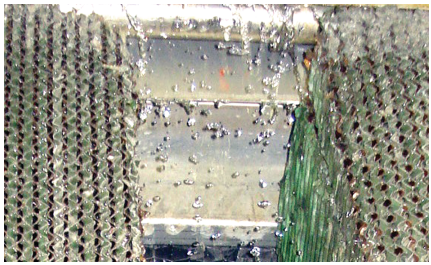
а)



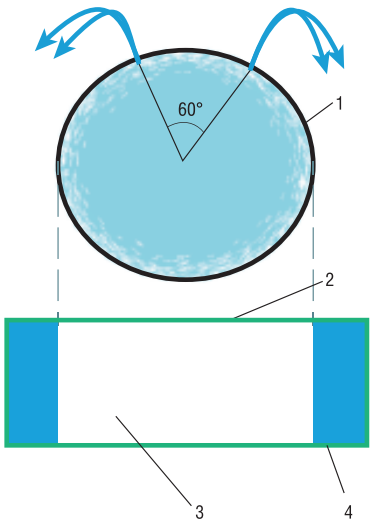
б)

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

турой), орошаемая водой, красным – участки, куда вода не попадает. По интенсивности окраски площади кассет орошаемого материала и приведенной ее градуировке в тепловизоре (*рис. 5.1*) можно более точно, по сравнению с визуальным осмотром, оценить площадь орошения водой и уровень температурного поля испарительных кассет.



а)



б)

Рис. 5.2. Процесс орошения кассет ОУ ИТ: а) в реальных условиях; б) 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

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. Этот метод позволяет своевременно обнаруживать неравномерную подачу воды на испарительные кассеты и принимать меры к ее устранению. Для улучшения орошаемости испарительных кассет необходимо регулировать (увеличивать) подачу охлажденной цикловой воды по ярусам и сторонам ОУ ИТ энергетических ГТУ.

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

В результате 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 под трубой орошения остается сухой (*рис. 5.3*).

При таком расположении отверстий водой орошается не вся площадь испарительных кассет, на их поверхности появляются сухие участки, и, как

следствие, снижается эффективность работы ОУ ИТ (*рис. 5.4*).

Согласно инструкции по эксплуатации, при обслуживании ОУ ИТ ГТУ необходимо периодически осматривать отверстия труб орошения диаметром 3 мм и при необходимости прочищать 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, ввиду 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 (*рис. 5.2*). К тому же, как показывает практика обслуживания ОУ ИТ, при сильном загрязнении отверстий тонкая проволока гнется и не выполняет своего назначения.

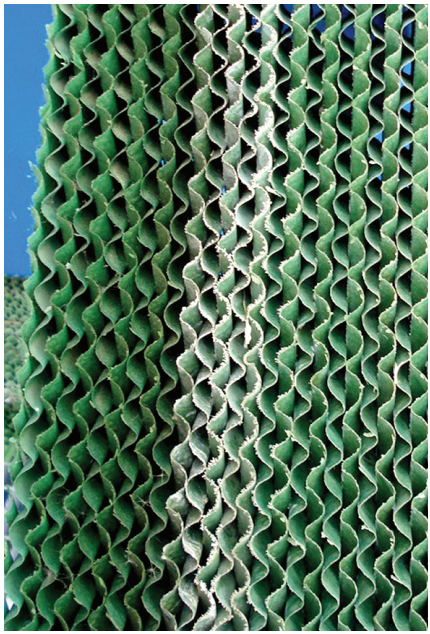


Рис. 5.3. Сухая площадь под трубой орошения на водораспределительной кассете

На ТЭЦ с высокой культурой обслуживания осмотр и очистка отверстий на трубах орошения ОУ ИТ проводится с помощью телескопических поворотных зеркал с подсветкой и самодельными крючками (*рис. 5.5*).

Причем для пластмассовых труб орошения использование металлических (даже проволочных) крючков для прочистки отверстий нежелательно, поскольку

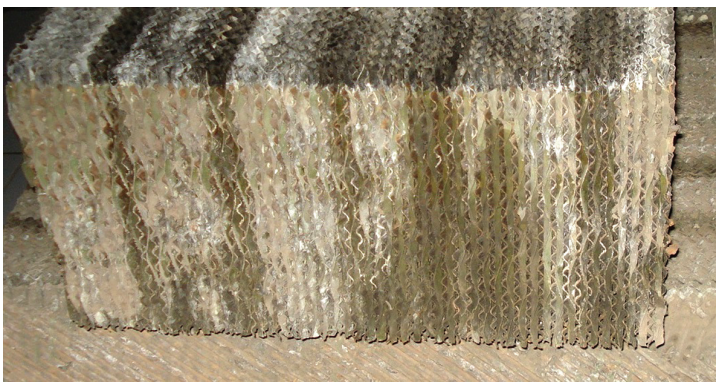


Рис. 5.4. Неравномерное орошение испарительных кассет ОУ ИТ

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

через определенное время в результате воздействия металла на пластмассу диаметр отверстий может быть деформирован и превысит оптимальные, с точки зрения производителя, размеры. Расчетная подача охлаждающей воды на кассеты орошаемого материала может быть нарушена. К сожалению, 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 быстрый и эффективный осмотр состояния труб орошения и дренажа изнутри возможен с помощью эндоскопов и видеоскопов. Видеоскоп – это одна из разновидностей эндоскопов, представляющая собой оптико-электронный прибор для визуального осмотра внутренних полостей механизмов. На *рис. 5.6* показано дросселирование отверстия и проходного сечения трубы орошения (получено с помощью промышленного видеоскопа фирмы Olympus). Отверстия в трубах орошения ОУ ИТ при использовании воды повышенной жесткости и с высокой минерализацией постепенно заполняются нерастворимыми в воде солями кальция.

Процесс дросселирования отверстий труб орошения происходит следующим образом. Первоначально у основания отверстий диаметром 3 мм формируются небольшие, а затем крупные отложения, препятствующие нормальному прохождению по трубам охлаждающей воды. Формирование отложений у основания отверстий обусловлено тем, что в процессе изготовления их сверление осуществляется с наружной стороны труб, в результате чего на внутренней стороне по-

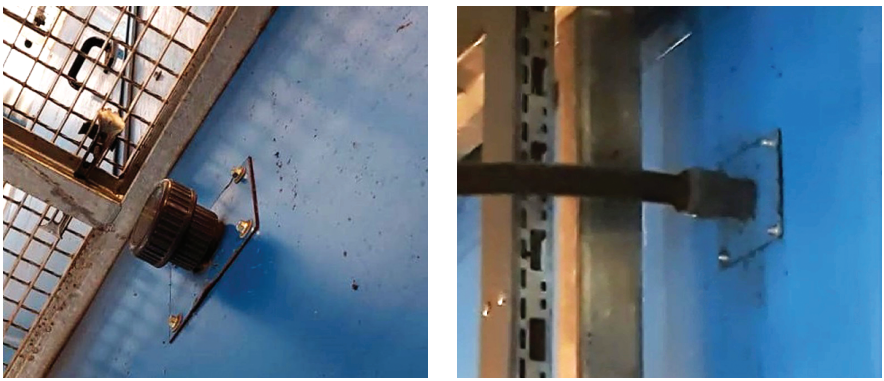
а)

б)

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

являются зазубрины. С течением времени в этих местах за счет адгезии образуются заторы, сформированные большими массами отложений, препятствующие равномерному распределению охлаждающей воды по ярусам и всасам ОУ ИТ энергетических ГТУ.

Для осмотра трубы орошения должны иметь съемные торцевые заглушки (*рис. 5.7а*). Кроме того, в процессе эксплуатации целесообразно открывать эти заглушки для очистки труб от образовавшихся отложений водой. На *рис. 5.7б* изображен процесс удаления отложений из труб орошения через открытые торцевые заглушки под давлением циркуляционной воды (проливка водой).



а) *б)*

Рис. 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.

С целью оценки эффективности очистки труб орошения ОУ ИТ от отложений проливкой цикловой водой через торцевые заглушки, с помощью видеоскопа был проведен сравнительный анализ количества задросселированных отложениями отверстий в трубе до и после проливки. Документированный анализ показал, что более 95 % отверстий были заблокированы загрязнениями в трубе до проливки водой и 80 % после очистки. Проливка цикловой водой труб орошения ОУ ИТ позволила 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

Рис. 5.8. Отложения в трубе дренажа ОУ ИТ

их длине: так, в районе торцевых заглушек отложения плотные, с высокой адгезийностью к материалу труб. В трубах из нержавеющей стали адгезийность отложений выше, чем в трубах из прочной пластмассы. В линиях дренажа цикловой воды отложения становятся слоистыми, менее прочными, сцепление с внутренней поверхностью труб ослабевает (*рис. 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) очистки элементов ОУ ИТ этим способом не представлено.

На ТЭЦ, где используется вода из артезианских скважин, для периодической очистки элементов орошения от отложений применяется раствор перекиси водорода и лимонной кислоты. (Как известно, перекись водорода в бытовых и промышленных условиях используется в качестве окислителя, отбеливающего агента и антисептика в виде разбавленного раствора). Дважды за сезон использования ОУ ИТ элементы кассет орошения 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 орошения наблюдаются биообрастания (зеленого цвета). В этом случае раствор лимонной кислоты заменяется биоцидом, а перекись водорода остается прежней (0,1 %). По опыту ТЭЦ, высохшие элементы кассет орошения после их снятия не поддаются очистке ни пылесосом, ни промывкой водой.

На некоторых ТЭЦ очистка труб орошения и дренажа ОУ ИТ ГТУ производится 5 %-ным раствором ортофосфорной кислоты вместе с механической чисткой щеточными шомполами. Если трубы орошения из нержавеющей стали, можно проводить 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 путем промывки труб ОУ ИТ подачей в них подогретой умягченной (Na-катионированной) воды для размягчения отложений с последующей отчисткой специальными щетками. На каждой ТЭЦ способ очистки выбирается исходя из степени загрязненности труб ОУ ИТ, материала, из которого они изготовлены, прочности адгезионной связи отложений с материалом трубопроводов.

В ЦФО было принято решение о замене водопроводной воды в качестве цикловой на Na-катионированную. Этому решению предшествовала кропотливая работа по оценке влияния различного качества воды на оросительные и водораспределительные кассеты ОУ ИТ ГТУ. Минимальной жесткостью обладает химически обработанная вода: умягченная (после Na-катионитного фильтра) и обессоленная. Важно отметить, что общая минерализация умягченной воды значительно выше, чем обессоленной, но ниже, чем водопроводной (*табл. 5.1*).

Основные показатели различного типа воды ***Таблица 5.1***

	Жесткость общая, мгЭ/дм³	Содержание кальция (в виде $CaCO_3$), мгЭ/дм³	Содержание магния (в виде $MgCO_3$), мгЭ/дм³	pH	Общая минерализация, мг/дм³
Умягченная вода (после Na-катионитного фильтра)	0,025	0,015	0,010	8,1	235
Обессоленная вода	0,005	0,0	0,0	8,6	4
Водопроводная вода	4,8	3,0	1,8	7,25	246,0

При этом водородный показатель pH воды, подвергшейся химической обработке, выше значений, приведенных в инструкции по эксплуатации ОУ ИТ ГТУ. Значения pH умягченной воды даже на ТЭЦ, расположенных в одном городе, могут значительно различаться, что обусловлено качеством исходной воды для водоподготовки. Например, на одной ТЭЦ исходной является вода из артезианского колодца, а на другой – из циркуляционной системы котельного оборудования с более высоким pH.

При фильтровании через слой катионита происходит замещение присутствующих в воде катионов солей жесткости Ca^{2+} и Mg^{2+}, способных к образованию накипи на поверхностях нагрева, на катионы Na^{+} фильтрующего материала, не образующие накипи.

Протекающие процессы ионного обмена описываются следующими уравнениями реакций:

$$Mg^{2+}(Cl^{-})_2 + 2Na^{+}R^{-} \rightarrow Mg^{2+}R^{-}_2 + 2Na^{+}Cl^{-} \quad (1),$$

$$Ca^{2+}(HCO_3^{-})_2 + 2Na^{+}R^{-} \rightarrow Ca^{2+}R^{-}_2 + 2Na^{+}HCO_3^{-} \quad (2)$$

Одним из недостатков Na-катионирования является высокое солесодержание 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 в ЦФО перед переходом с водопроводной на умягченную цикловую воду были проведены опыты по смешению Na-катионированной воды с водопроводной для снижения жесткости (*табл 5.2*).

Исходные показатели катионированной и водопроводной воды ***Таблица 5.2***

	pH	Общее солесодержание, мг/дм³	Жесткость общая, °Ж
Na-катионированная вода	8,6	280	0,025
Водопроводная вода	7,25	218	4,7

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

Результаты смешения Na-катионированной и водопроводной воды ***Таблица 5.3***

Na-кат / водопр, %	pH	Общее солесодержание, мг/дм³	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 смешанных вод начинает снижаться по мере увеличения процентного содержания Na-катионированной воды и достигает 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 солесодержания (общей минерализации) смешанной воды. Несмотря на то что при химических лабораторных исследованиях удалось значительно снизить показатели жесткости водопроводной воды добавлением в нее умягченной, уровень °Ж остается еще высоким, что соответствует воде средней жесткости. Жесткость Na-катионированной воды в 88 раз ниже жесткости смеси двух вод, и в 188 раз ниже водопроводной.

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

Для имитации условий эксплуатации образцы кассет ОУ ИТ ежедневно поливались свежей водой, таким образом уровень испаряемой за сутки воды дополнялся до исходного уровня. По установленному графику через равный промежуток времени контролировалось состояние образцов кассет ОУ ИТ и уровень отложений, выпавших в осадок. На *рис. 5.10* представлены фото отложений, образовавшихся на дне контрольной посуды для тестирования образцов в различных типах воды.

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

а) *б)* *в)*

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

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

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

Рис. 5.11. Врезка подачи умягченной воды на ОУ ИТ

Не все трубы орошения поставленных ОУ ИТ для энергетических

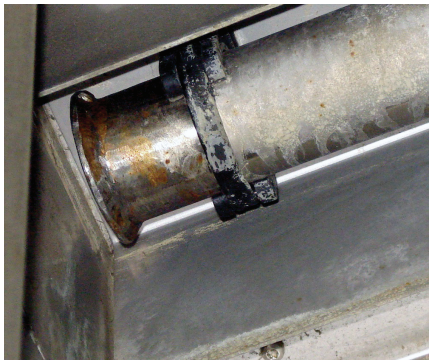


Рис. 5.12. Торцевая заглушка на трубе орошения ОУ ИТ

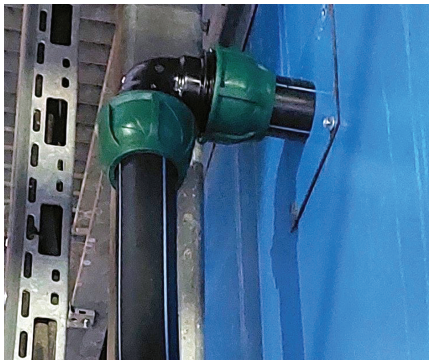


Рис. 5.13. Труба проливки цикловой воды

Рис. 5.14. Проливка труб орошения ОУ ИТ цикловой водой

ГТУ в ПАО «Мосэнерго», были оснащены съемными торцевыми заглушками, позволяющими при обслуживании оборудования проверить внутреннее состояние труб орошения их проливкой 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 съемные проливка трубопроводов могла сопровождаться загрязнением оросительных кассет (*рис. 5.12*).

Для устранения этого конструктивного недостатка сотрудники блоков ПГУ, обслуживающие ОУ ИТ, самостоятельно выполнили комплекс мероприятий по обеспечению доступа в трубы орошения. Торцевые окончания труб орошения 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 (*рис. 5.13*).

В результате появилась возможность оперативного мониторинга состояния труб и своевременной их проливки цикловой водой для удаления зарождающихся отложений (*рис. 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. Объем осадков, удаленных из труб орошения при работе ОУ ИТ ГТУ на умягченной воде, резко снизился по сравнению с эксплуатацией на водопроводной цикловой воде.

Рис. 5.15. Отложения при использовании умягченной воды

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

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

Результаты анализа отложений в оросительной трубе ОУ ИТ ГТУ ***Таблица 5.4***

Метод анализа	Компонент	Массовая доля, %
СО 34.37.306-2001	Потери/привес при прокаливании	23,74/–
Рентгено-флуоресцентная спектрометрия	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

Из представленных данных видно, что превалирует в отложениях диоксид кремния SiO_2. Его бесцветные кристаллы практически нерастворимы в воде, обладают высокой твердостью и прочностью. При работе на водопроводной воде содержание SiO_2 в отложениях в этой же трубе составляло всего 1,84 % (*табл. 4.5*). Вторым по значимости химическим соединением в отложениях стал оксид кальция CaO – 25,59 %, что в два раза меньше, чем при работе на водопроводной воде. Оба этих химических 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 отложений привело наличие 10,45 % оксида железа, что практически в 8 раз больше, чем в отложениях от водопроводной воды.

Выбор в качестве цикловой воды ОУ ИТ более дорогой умягченной, по сравнению с водопроводной, обусловлен не финансовыми, а техническими соображениями. Ежеминутная, кажущаяся выгода при обосновании окупаемости финансовых проектов может впоследствии обернуться 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. С целью улучшения визуального контроля внутреннего состояния труб орошения и качества их очистки водоводы были выполнены

Рис. 5.16. Трубопроводы проливки системы орошения ОУ ИТ

Рис. 5.17. Состояние труб орошения после очистки

разъемными с помощью соединительных муфт и фасонных деталей по всей высоте КВОУ ГТУ (*рис. 5.16*). В результате на ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» повысилась ремонтопригодность оборудования ОУ ИТ, расширились возможности использования различных вариантов и способов качественной очистки труб орошения при их снятии (*рис. 5.17*).

Для проверки качества очистки отверстий (Ø 3 мм) распылом цикловой воды целесообразно в затемненном помещении освещать внутреннюю поверхность труб орошения лампочкой низкого напряжения (*рис. 5.18*).

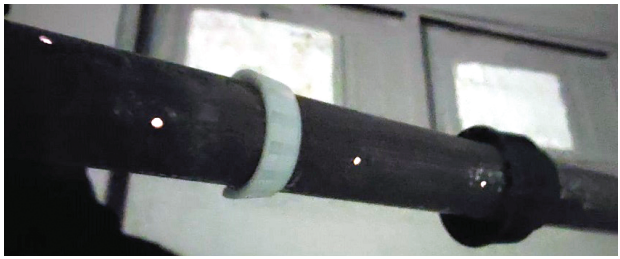


Рис. 5.18. Проверка качества очистки отверстий в трубах орошения ОУ ИТ ГТУ

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-2 с ОУ ИТ ГТУ, где КВОУ с трехсторонним всасом расположены на крыше машинного зала, а бак с питательной водой размещен 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-3, где ОУ ИТ располагается в том же помещении, что и бак с запасом питательной воды, возвышаясь над ним всего на два 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 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 показана штатная труба орошения на первом ярусе со стороны установки бака с водой (*рис. 5.19*).

В процессе модернизации ОУ ИТ эта дренажная линия была заглушена и смонтирована дополнительная труба индивидуального слива воды с левой секции второго и третьего ярусов (*рис. 5.20*).

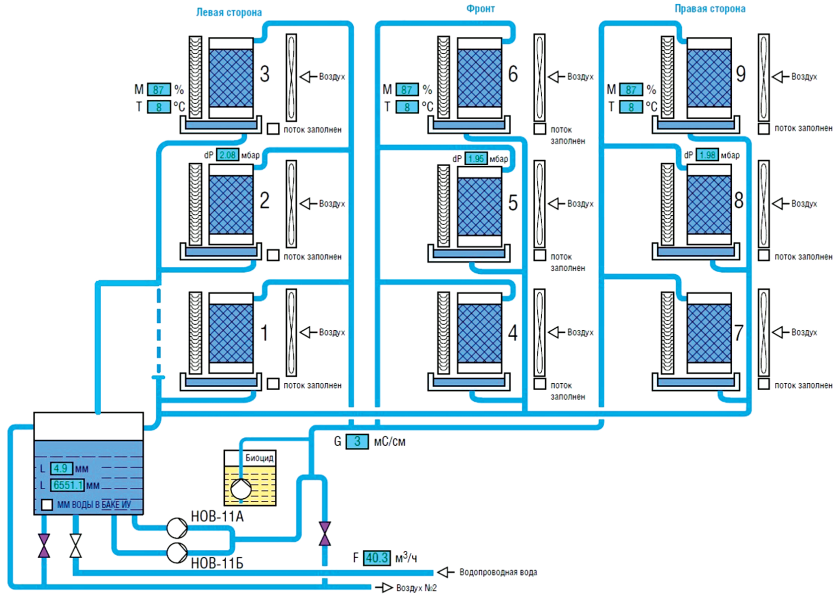


Рис. 5.19. Штатная и модернизированная схема дренажа ОУ ИТ ТЭЦ-3

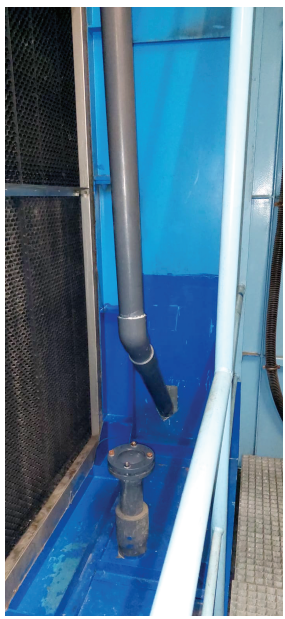


Рис. 5.20. Модернизированная линия дренажа ОУ ИТ

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 может не представиться возможность увеличить подачу воды на оросительные кассеты для интенсификации процесса испарения 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.

Выводы:

– при обосновании окупаемости финансовых проектов по ОУ ИТ энергетических ГТУ в процессе выбора цикловой воды для ее работы необходимо ориентироваться не только на финан-

совые 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 проверить в химической лаборатории агрессивность влияния выбранной цикловой воды на материал испарительных и водораспределительных кассет;

– очистка отверстий диаметром 3 мм в трубах орошения от загрязнений согласно инструкции по эксплуатации ОУ ИТ проволочным 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, визуально оценить и принять меры к устранению выявленных недостатков в поступлении охлажденной воды на кассеты ОУ ИТ;

– не на всех ОУ ИТ энергетических ГТУ трубы орошения оснащены съемными торцевыми заглушками. В результате сотрудники компаний, обслуживающие оборудование, вынуждены 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 отложения и дросселирование отверстий водоводов, что позитивно сказалось на орошении кассет и глубине охлаждения циклового воздуха энергетических ГТУ;

– модернизация систем ОУ ИТ в филиалах ПАО «Мосэнерго» дала возможность повысить их ремонтопригодность, качественно очищать трубы орошения и предотвращать перерасход цикловой воды из-за переполнения 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 этого 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;

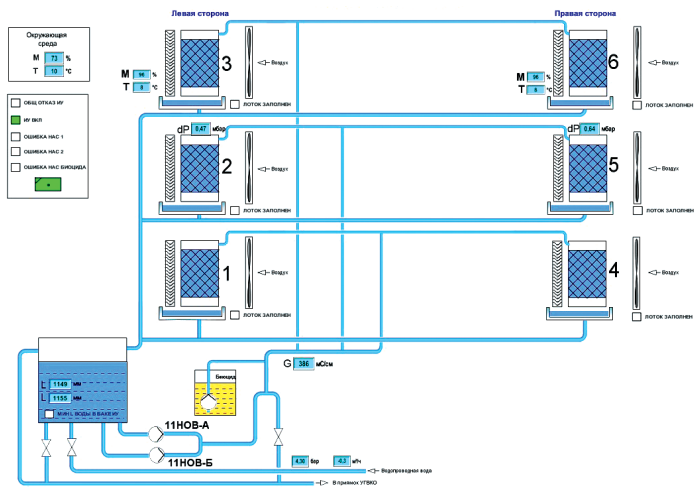


Рис. 6.1. Схема ОУ ИТ ГТУ ПАО «Мосэнерго» с односторонним всасом

– 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. рис. 2.4*).

На КВОУ ТЭЦ-1 (*рис. 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 фильтрами тонкой очистки группы EPA класса E11 глубиной 400 мм.

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 °С, а относительная влажность RH ≤ 80 %. Общим для всех рассматриваемых ОУ ИТ ТЭЦ является то, что май и сентябрь в Москве – месяцы с неустойчивой погодой. Согласно

Рис. 6.2. КВОУ ГТУ ТЭЦ-1 с ОУ ИТ

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 в дождь 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 (отношения 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 опыт в первый год эксплуатации оборудования 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*).

Надо 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 остановы 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 %.

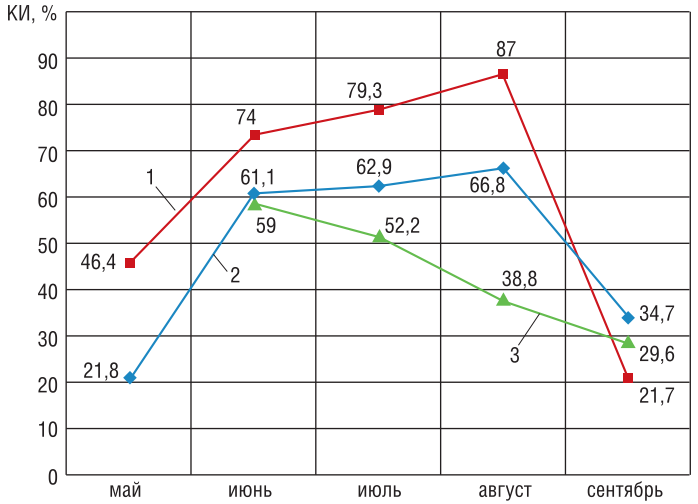


Рис. 6.3. Коэффициент использования ОУ ИТ ТЭЦ-3: 1 – 2021 г.; 2 – 2020 г; 3 – 2019 г.

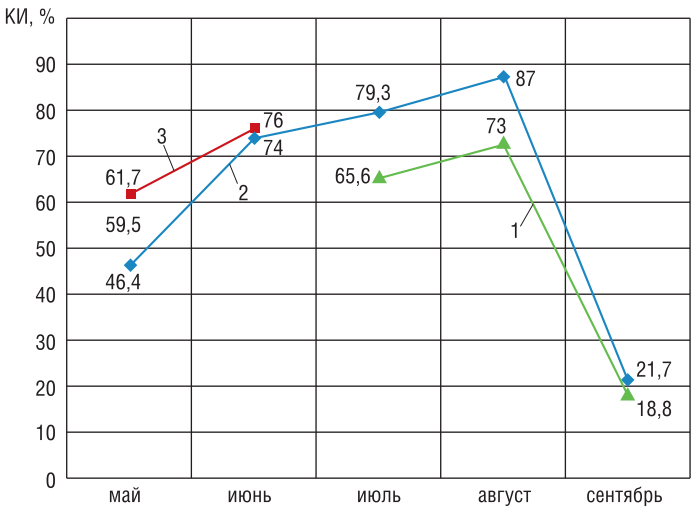


Рис. 6.4. Коэффициент использования ОУ ИТ в 2021 г.: 1 – ТЭЦ-1; 2– ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-2

Другим интересным показателем является среднесуточное увеличение мощности энергоблока $\Delta N_э$ за счет работы ОУ ИТ. На *рис. 6.5* показаны зависимости $\Delta N_э$ 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 $\Delta N_э$ составила 4 МВт.

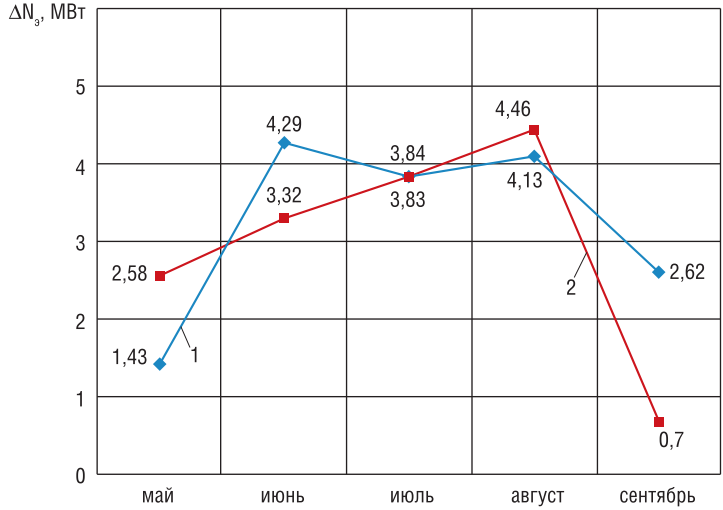


Рис. 6.5. Среднесуточный за месяц прирост мощности ТЭЦ-3 при использовании ОУ ИТ: 1 – 2020 г.; 2 – 2021 г.

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 дополнительной мощности. Все три энергоблока ПГУ с ОУ ИТ ГТУ ПАО «Мосэнерго» участвуют в программе НПРЧ (*рис. 6.6*).

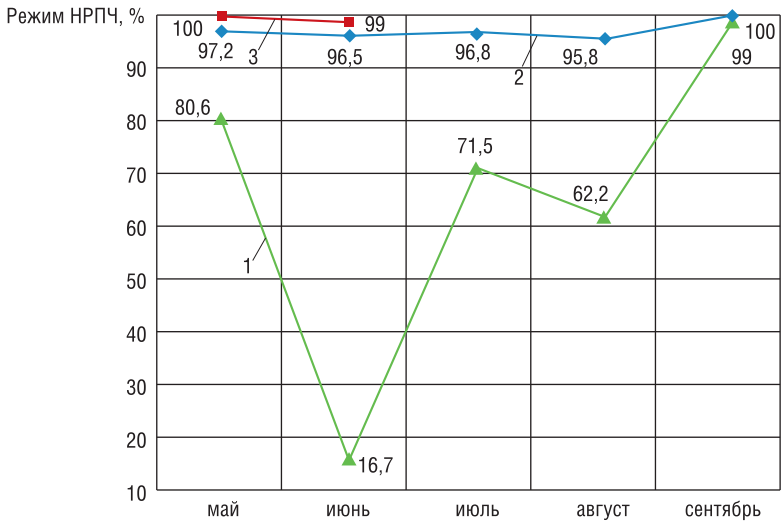


Рис. 6.6. Работа ТЭЦ с ОУ ИТ в режиме НПРЧ в 2021 году: 1 – ТЭЦ-1; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-2

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 $\Delta N_э$ от периода эксплуатации ОУ ИТ ТЭЦ в 2021 г.

Тренды $\Delta N_э$ 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 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.

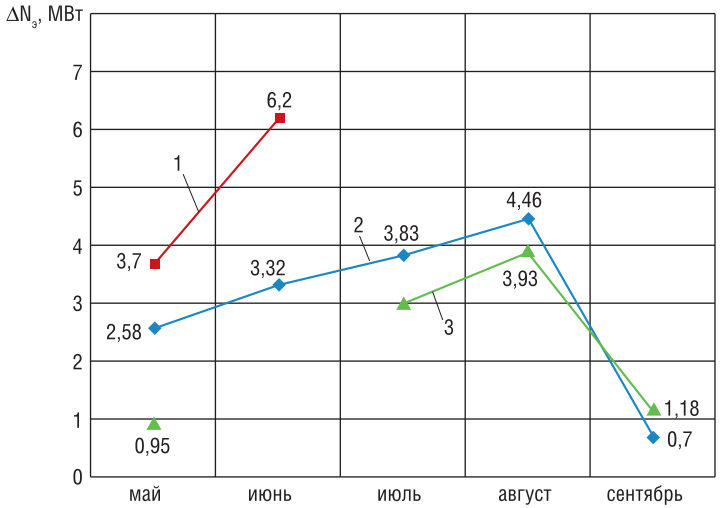


Рис. 6.7. Среднесуточный за месяц прирост мощности ТЭЦ при использовании ОУ ИТ в 2021 году: 1 – ТЭЦ-2; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-1

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 °С, 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.

Влияние ВНА на глубину охлаждения воздуха в ОУ ИТ и мощность ГТУ ТЭЦ-3 ***Таблица 6.1***

Положение ВНА, %	Глубина охлаждения, °С	$\Delta N_э$, 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 $\Delta N_э$ в режиме без НПРЧ по сравнению с режимом НПРЧ составляет 1 МВт (*табл. 6.1*).

Таким образом, фактор угла открытия ВНА оказывает превалирующее 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 $\Delta N_э$ ГТУ и ПГУ. В таких случаях коэффициент использования может быть большим, а дополнительная мощность $\Delta N_э$ минимальной.

В целях усиления контроля за использованием ОУ ИТ ГТУ в ПАО «Мосэнерго» был введен коэффициент эффективности КЭ = $\Delta N_э$/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.

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.

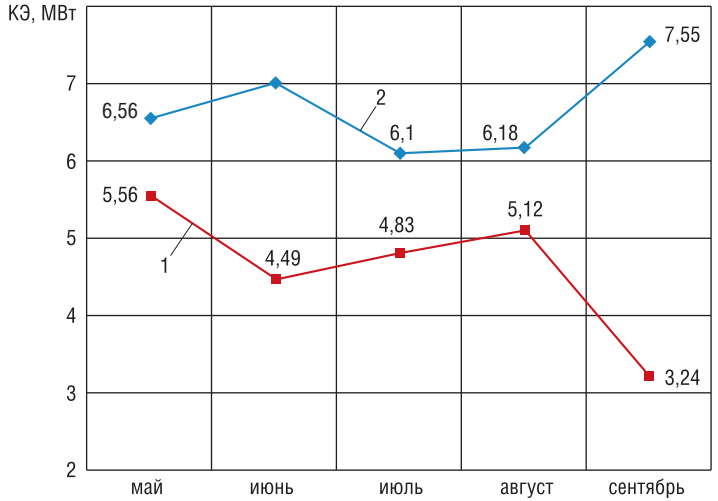


Рис. 6.8. Коэффициент эффективности ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ-3: 1 – 2021 г.; 2 – 2020 г.

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. Значение 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*).

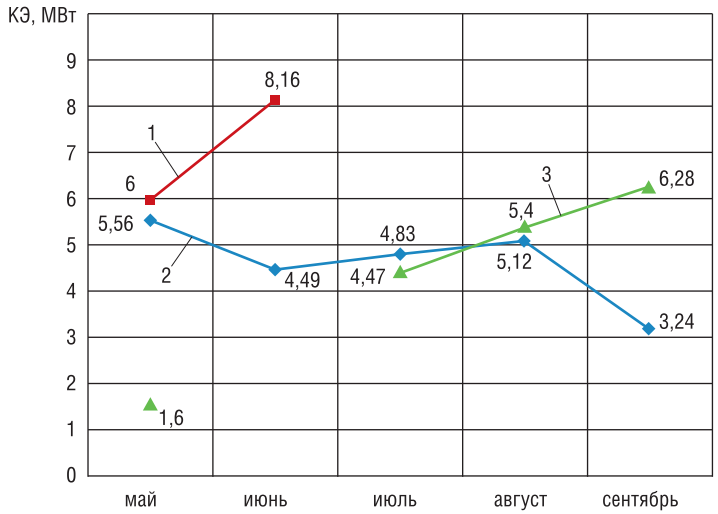


Рис. 6.9. Коэффициент эффективности ОУ ИТ ТЭЦ в 2021 г: 1 – ТЭЦ-2; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-1

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 $Q_в$ для нужд ОУ ИТ на ТЭЦ-3 за 2020 и 2021 гг.

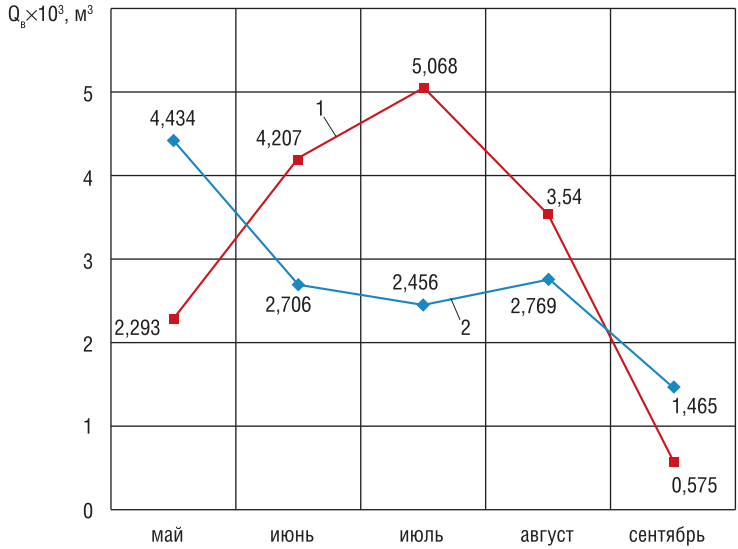


Рис. 6.10. Расход воды на ОУ ИТ ТЭЦ-3 в 2020 и 2021 гг.: 1 – 2021 г.; 2 – 2020 г.

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 уменьшив 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.

Регулировка подачи воды на ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ-3 ***Таблица 6.2***

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.

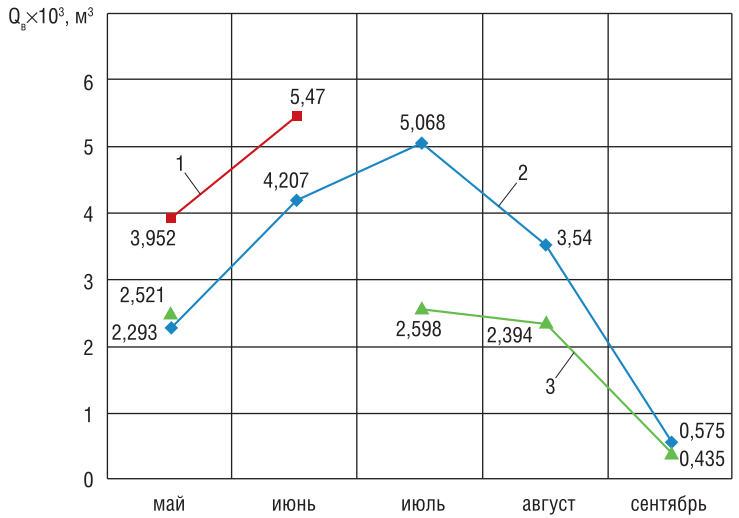


Рис. 6.11. Расход воды на ОУ ИТ ТЭЦ в 2021 г: 1 – ТЭЦ-2; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-1

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 $Q_в$ 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 помещение 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.

Основные факторы, оказавшие негативное влияние на эффективность работы ОУ ИТ в 2022 г.:

► несоответствие погодных условий (температуры и влажности заборного воздуха) прогнозным данным, холодный май и сентябрь;

► останов блока ПГУ-420 ТЭЦ-2 в августе для проведения текущего ремонта;

► длительный простой ОУ ИТ на ТЭЦ-1 в связи с плановым остановом блока ПГУ в июне–июле для проведения строительно-монтажных работ на ГРП;

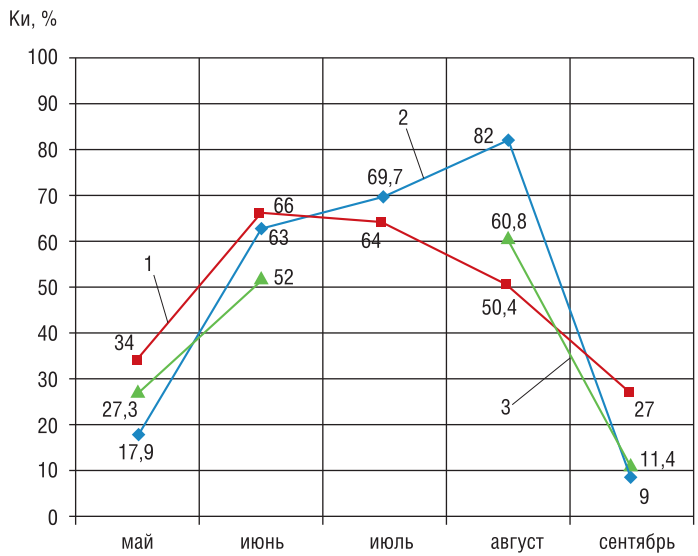


Рис. 6.12. Коэффициент использования (КИ) ОУ ИТ ГТУ: 1 – ТЭЦ-2, 2 – ТЭЦ 3; 3 – ТЭЦ-1 в 2022 году

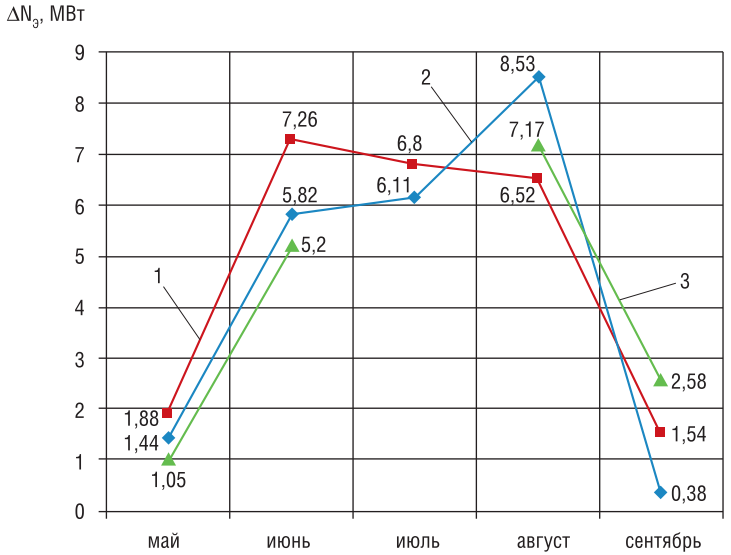


Рис. 6.13. Среднесуточный прирост мощности ТЭЦ при использовании ОУ ИТ в 2022 году: 1 – ТЭЦ-2; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-1 ПАО «Мосэнерго»

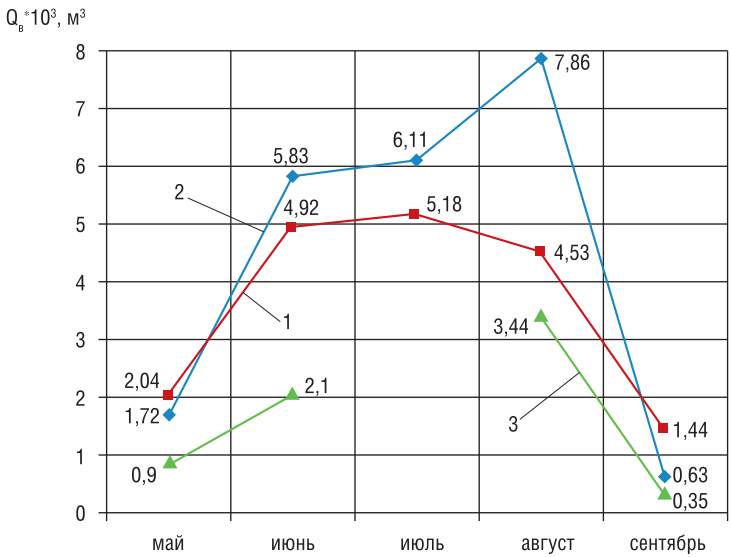


Рис. 6.14. Расход воды на ОУ ИТ ГТУ на ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» при использовании ОУ ИТ в 2022 году: 1 – ТЭЦ-2; 2 – ТЭЦ-3; 3 – ТЭЦ-1

► эксплуатационный износ значительной части оросительных кассет;

► более дорогая подпиточная вода качества ХОВ на ОУ ИТ ТЭЦ-3 и ТЭЦ-1.

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 $П_б$ от реализации дополнительно выработанной электроэнергии за счет ОУ ИТ, руб:

$$П_б = \sum \Delta N_э \, М,$$

где $\Delta N_э$ 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;

М = Ц – С – маржа от продажи, руб/МВт;

С – себестоимость, руб/МВт;

Ц – цена реализации, руб/МВт.

Затраты на собственные нужды ОУ ИТ (руб.) включают в себя затраты на работу электронасосов $З_н$, затраты на расход воды $З_в$, затраты на расходные материалы $З_{рм}$:

$$З_н = \tau \, N_н \, С;$$

$$З_в = \tau \, Q_в \, Ц_в,$$

где τ – время работы насоса ОУ ИТ, ч;

$N_н$ – мощность насоса ОУ ИТ, МВт;

$Q_в$ – расход воды, $м^3/ч$;

$Ц_в$ – цена воды, $руб/м^3$.

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

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

$$П_ч = П_б – З_н – З_в – З_{пв} – З_{р.м.}$$

Cura te ipsum – Исцели себя сам.
Латинское крылатое выражение

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 4 сезона, на ТЭЦ-2 – 3 сезона, а на ТЭЦ-1 – 2 сезона. Типичные повреждения этого оборудования ОУ ИТ зафиксированы на *рис. 7.1*.

Кассеты признавались подлежащими замене при следующих дефектах:

► износ, замятия сопрягаемой поверхности кассет, приводящие к появлению зазора между кассетами;

► повреждение, замятие углов, граней кассет;

► расслоение материала водораспределительных кассет;

► занос фронтальной поверхности отложениями пыли.

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

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

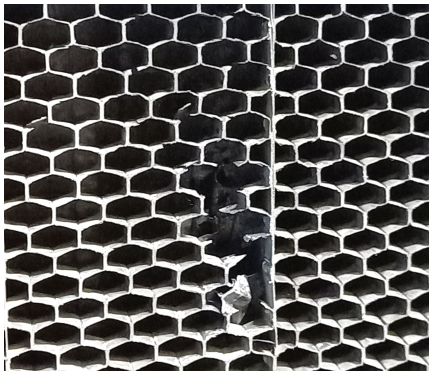
Кроме того, надо помнить, что целлюлоза горюча (*рис. 7.4*), поэтому при ремонтных и сварочных работах в ОУ ИТ необходимо строго соблюдать правила пожарной безопасности.

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

Результаты дефектации кассет и каплеуловителей ТЭЦ с ОУ ИТ ГТУ (%) ***Таблица 7.1***

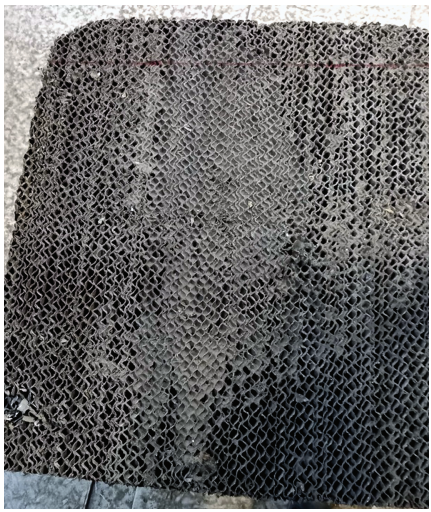
ТЭЦ	Срок эксплуатации	Водораспределительные кассеты CELdek 600×300×50	Кассеты TURBOdek 1500×600×300	Кассеты TURBOdek 1360×600×300	Каплеуловители TURBOdek 1500×700×125 1500×600×125
1	2	11,1	27,3	25,5	11,4
2	3	48,1	45,4	48,1	18,7
3	4	63,2	64,9	67,5	9,6

а)



б)

в)



г)

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

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, ТЭЦ-3 наблюдается значительное количество отложений, состоящих из песка, органических соединений воды, насекомых, плодов цветения растений (*рис. 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 (*рис. 7.5а*). Вблизи каплеуловителей пылевые отложения практически отсут-

ствуют. Отложения песка и органических соединений, содержащихся в воде, отмечаются и на всей поверхности каплеуловителей (*рис. 7.5б*).

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*.

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-1за два сезона в 2 раза. Целесообразно напомнить, что ОУ ИТ и КВОУ ГТУ на ТЭЦ-3 расположено 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

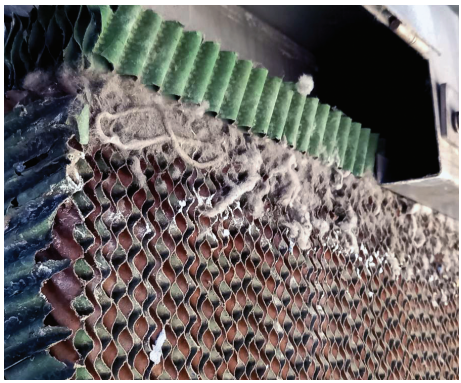


Рис. 7.2. Занос кассет ОУ ИТ ГТУ тополиным пухом

Рис. 7.3. Толщина материала кассет ОУ ИТ компании Munters

Рис. 7.4. Горение кассет из целлюлозы

а)

б)

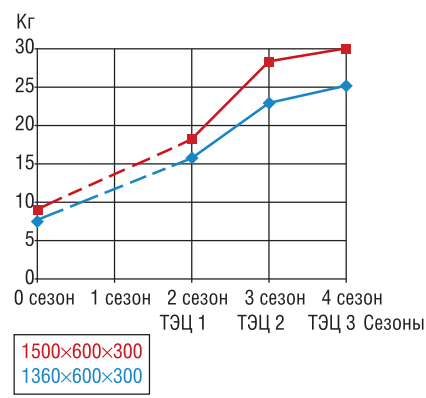
Рис. 7.5. Глубина проникновения загрязнений внутрь: а) кассет; б) каплеуловителей

этом они сами становятся источником загрязнений циклового воздуха ГТУ и роста перепада давления на всасе ВЗТ турбомашины.

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». С этой целью первоначально был протестирован образец новой кассеты TURBOdek, а затем образцы использованных кассет с ТЭЦ.

На *рис. 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.

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

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 %. И это несмотря на то что 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. Оросительные кассеты TURBOdek, отработавшие четыре сезона на ТЭЦ-3, более повреждены, чем на других ТЭЦ. В результате этих повреждений (*рис. 7.1*) при установке ранее использованных кассет в ОУ ИТ возникают ситуации, представленные на *рис. 7.9*.

При смещении верхних кассет относительно нижних влага не орошает всю поверхность нижестоящих элементов, 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 циклевой водой (*рис 7.9в*). Из-за повреждения кассет уменьшаются их габаритные размеры, что приводит к выпадению кассет из ОУ ИТ в процессе эксплуатации.

Недостаточной прочностью (*см. рис. 7.1*) и эффективностью сепарации влаги обладают каплеуловители шведского производителя ОУ ИТ. На *рис. 7.10а* отчетливо видно проникновение

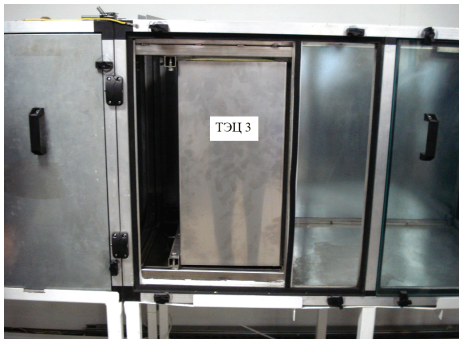


Рис. 7.7. Тестирование образца кассеты TURBOdec с ТЭЦ-3

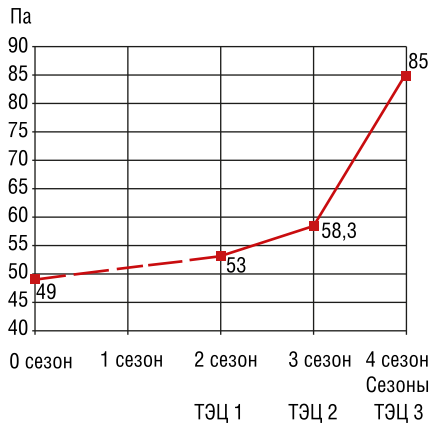


Рис. 7.8. Зависимость перепада давления на кассетах от срока эксплуатации на ТЭЦ

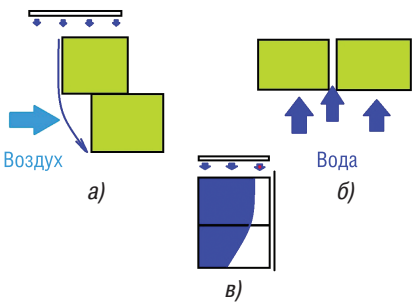
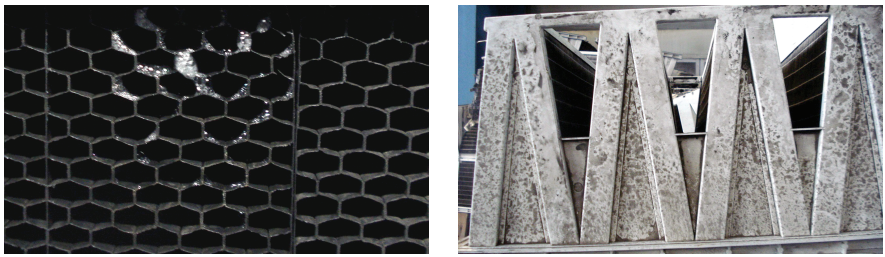


Рис. 7.9. Ситуации, возникающие при установке кассет в ОУ ИТ:
а) смещение; б) щели; в) дросселирование грязью отверстий подачи воды в трубах



а) *б)*

Рис. 7.10. 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

цикловой воды ОУ ИТ через каплеуловитель, в результате чего влага поступает в КВОУ на систему фильтрации циклового воздуха ГТУ (*рис. 7.10б*). Фильтровальный материал фильтр-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 КВОУ финишных фильтров класса E10-E11 согласно ГОСТ Р ЕН 779-2014), прогрессирующая деградация характеристик ГТУ и снижение выработки электроэнергии.

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

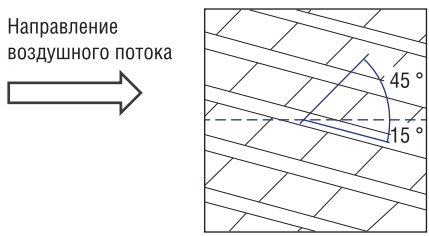


Рис. 7.11. Углы установки материала в кассете

Ввиду 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 (*рис. 7.11*). Целлюлозные листы усилены химической пропиткой для увеличения впитываемости.

Тестировались кассеты размером 1500×600×300 мм, 1360×600×300 мм и водораспределительная кассета 600×300×50 мм. На *рис. 7.12а* приведена фотография кассеты 1500×600×300 мм перед установкой, а на *рис. 7.12б* изображены все три кассеты, установленные в ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ-3.

Тестирование кассет продолжалось в течение 1337 часов, после чего был выполнен их внешний осмотр и дефектация. В результате осмотра дефектов

а) *б)*

Рис. 7.12. Кассеты компании ООО «Фильтрационные технологии»: а) перед установкой; б) в ОУ ИТ ГТУ ТЭЦ-3

или повреждений, препятствующих дальнейшей эксплуатации кассет, не выявлено. Отмечено, что на лицевой стороне кассет имеются незначительные очаги загрязнений тополиным пухом и плодами цветения растений (*рис. 7.13*).

В *главе 2* на *рис. 2.4* было показано состояние испарительных кассет компании Munters GmbH 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.

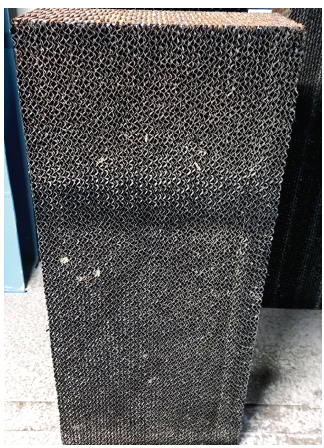


Рис. 7.13. Состояние кассеты через 1337 часов эксплуатации

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

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

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

– разработать технические решения, позволяющие снизить (исключить) загрязнения поверхности кассет;

– выполнить научно-исследовательскую работу по определению влияния углов установки листов материала в кассетах на перепад давления и эффективность ОУ ИТ ГТУ. Проанализировать влияние материала (целлюлоза, синтетика) кассет на их надежность и долговечность во время эксплуатации ОУ ИТ;

– разработать более прочную конструкцию каплеуловителей ОУ ИТ.

Заключение

1. Наибольшая эффективность при использовании ОУ ИТ достигается в летнее время при полном открытии ВНА осевого компрессора ГТУ за счет расширения регулировочного диапазона нагрузок.

2. Эксплуатация ПГУ в режимах регулирования частоты в энергосистеме несколько снижает эффективность ОУ ИТ ГТУ.

3. Значительное влияние на эффективность охлаждения циклового воздуха ГТУ и затраты на собственные нужды ОУ ИТ оказывает качество воды, подаваемой на охлаждение.

4. Отношение дополнительно генерируемой электрической мощности к коэффициенту использования ОУ ИТ ГТУ является показателем эффективности ее использования.

5. Применение ОУ ИТ на энергоблоках ПГУ, расположенных в регионах с устойчивым сухим и теплым климатом, позволит наиболее эффективно использовать охлаждение циклового воздуха ГТУ по адиабатическому процессу и увеличить выработку электроэнергии при высоких температурах окружающей среды.

6. Основные факторы, снижающие эффективность работы ОУ ИТ энергетических ГТУ:

► 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 в Москве, одновременно он и самый дождливый с высоким уровнем относительной влажности;

► остановы ПГУ для проведения ремонта;

► эксплуатационный износ испарительных кассет;

► более дорогая химически очищенная вода по сравнению с водопроводной.

7. Использование ОУ ИТ для ГТУ предусматривает применение в качестве коагуляторов первой ступени очистки воздуха КВОУ воздушных фильтров с высокой водостойкостью, изготовленных, например, по технологии Drop Safe.

8. В ЦФО России для охлаждения циклового воздуха энергетических ГТУ наиболее целесообразно использование АБХМ.

Краткая историческая справка

Карл Георг Мунтерс (Carl Georg Munters) (https://ru.wikipedia.org/wiki/Мунтерс_Карл)

Карл Мунтерс родился 22 марта 1897 г. в Швеции. В 1918 году был зачислен в Королевский технологический институт. Во время учёбы 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 основатель компании Electrolux А. Веннер-Грену. Так появился первый в мире абсорбционный холодильник, который работал на газе, керосине или электричестве.

В 1955 году К. Мунтерс вместе с партнерами основал собственную компанию Munters & Co, ныне мировой лидер 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. И1*.

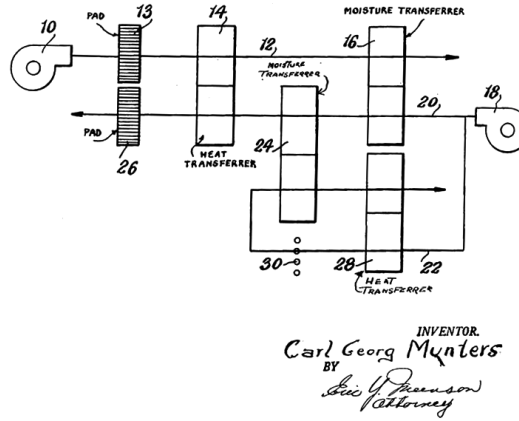


Рис. И1. Схема работы устройства

Описание изобретения. Воздух из помещения удаляется в атмосферу через канал 12 под действием вентилятора 10 (*рис. И1*). Перед этим он охлаждается, проходя через испарительные кассеты 13 (PAD). Адиабатически охлаждённый в PAD воздух поступает в теплообменник 14, где нагревается, а затем проходит через верхнюю часть устройства для переноса влаги 16 (moisture transferrer), 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 подаётся в помещение, в то время как через канал 22 часть воздуха возвращается в атмосферу после прохождения им теплообменника 28 и устройства для переноса влаги 24. Наружный воздух, движущийся по каналу 20, сначала проходит через нижнюю часть устройства для 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 устройства для переноса влаги 24, который, 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, поступая в нижнюю часть кассет 24, регенерируется. Далее ещё тёплый воздух про-

ходит через верхнюю часть теплообменника 28, где передаёт 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.

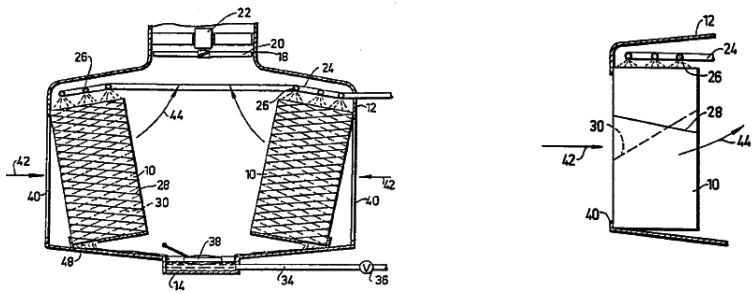
Целью устройств 16 и 24 является передача влаги от одного воздушного потока к другому. Для достижения как можно более высокого коэффициента переноса влаги эти кассеты не должны передавать тепло совсем или передавать его лишь в незначительном количестве. Элементы, передающие влагу, относятся к регенеративному типу, включающему передающий элемент (насадку), который циклически перемещается поперек потоков, между ними осуществляется термодинамический обмен. Секция переноса влаги может состоять из лабиринта проволок или слоёв 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 нём описываются охладительные кассеты, в которых гофры соседних листов наклонены относительно вертикали. Таким образом пространству между листами придаётся 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. И2а* 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.

На *рис. И2б* показана идентичная установка, но в ней, в отличие от предыдущей, испарительные кассеты расположены вертикально, а листы установлены так, чтобы гофры одного набора листов имели бóльший угол относительно горизонтали (со стороны воды менее 45° (20–35°), чем второй набор гофрированных листов со стороны воздуха (допускается 0° (горизонтальное расположение).



а) *б)*

Рис. И2. 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

07.01.1970 K. 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 отвердеванию 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 её верхнюю и нижнюю грани. Такое решение обусловлено тем, что верх-

няя часть кассеты подвергается воздействию потока воды, а нижняя принимает на себя вес контактного тела. Армирующий слой следует изготавливать из огнестойкого материала.

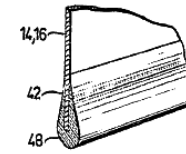


Рис. И3. Армирующий (упрочняющий) слой испарительных кассет

Формирование упрочняющего слоя происходит путём погружения слоёв в ванну и последующего застывания материала на кассетах. Выпуклость (*рис. И3, 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. И3*), и тем самым может вызвать дросселирование потока.

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 для использования в охладительных 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. И4*) 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 подаётся 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 «Improvements in and relating to contact bodies» (1, 177,124 от 07.01.1970).

Полотно 16, которое может иметь толщину около одной или несколько 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 ва-

лами 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.

Секция В, примыкающая к пропиточной секции А, снабжена формирующим элементом, который выполнен с возможностью непрерывного перемещения 34 (*рис. И4*) и поддерживается рамой 36 (*рис. И5*). Формы гофрирования содержат ряд пластин 38 (рис. И5а), каждая из которых содержит рамку 40 и внутреннюю часть, имеющую диагонально идущие, взаимно-параллельные рёбра и канавки 42.

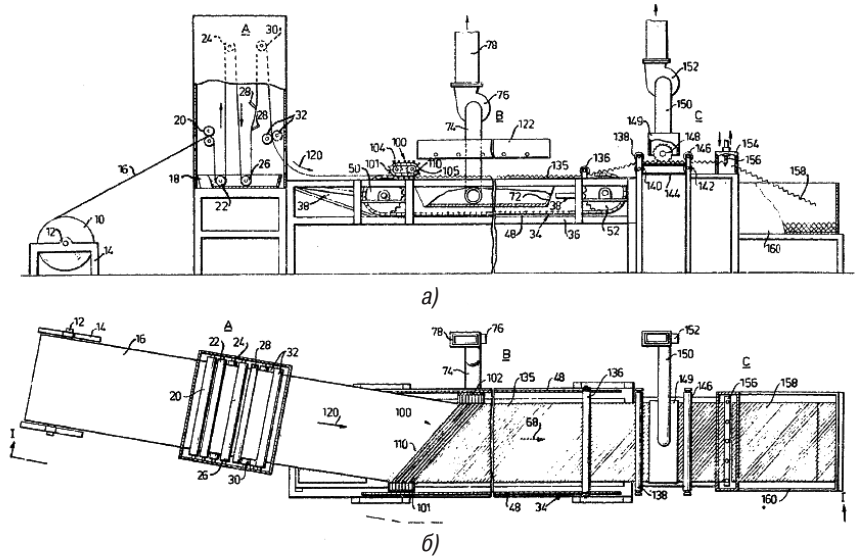


Рис. И4. Аппарат для изготовления гофрированных листов: а) фронтальный вид; б) вид сверху

Эти канавки могут быть образованы сплошной пластиной 44 (*рис. И5а*) или пластинчатыми элементами 46, которые согнуты под углом и немного отдалены друг от друга, как это показано на *рис. И5б*. Пластины должны быть тонкими, чтобы иметь как можно меньшую теплоёмкость 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. И4*), закрытый снизу и по бокам, но открытый сверху. Он посредством воздуховода 74 соединён с вытяжным вентилятором 76, который, в свою очередь, соединён с воронкой 78. С помо-

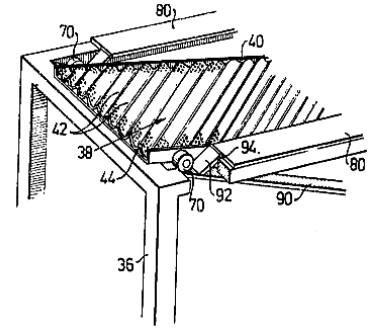
щью этого вентилятора в колпаке или камере 72 поддерживается частичный вакуум около 25–75 мм водяного столба.

Нагреватель 122 лежит над формующей 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 °С или выше, так что целлюлозное полотно подвергается интенсивному тепловому излучению.

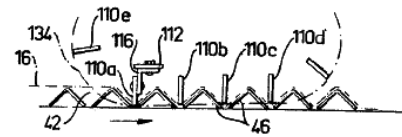
Угол «а» (*рис. И6*) диагональных канавок 42 определяется преобладающими факторами: например, в насадке градирни, через которую проходят воздух и жидкость, угол может быть, как больше, так и меньше 45°.

Гофрирование по диагонали вызывает угловое натяжение бумажного полотна и уменьшение его ширины. Важно, чтобы полотно вводилось под таким углом к направлению движения формующих элементов 38 и 100, чтобы это обеспечивало компенсацию бокового смещения материала. Этот угол показан на *рис. И6*, где также указаны направления движения полотна 120 и 68.

Пропитанное влажное полотно 16 вводят между формующими 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. И5б* одна планка или полоса 110а только что достигла дна канавки, вдавливая в неё перемычку 134, обозначенную пунктирной линией. Для удаления паров из бумажного полотна может



а)



б)

Рис. И5. Аппарат для изготовления гофрированных листов:
а) – формирующий элемент секции;
б) – процесс гофрирования

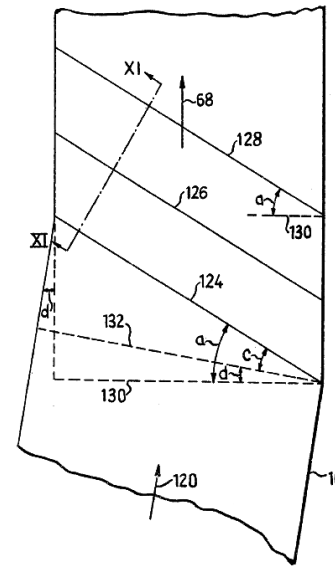


Рис. И6. Направления и углы формирования гофр

быть предусмотрена специальная система вентиляторов. Готовые гофрированные листы направляются в секцию С для резки (*см. рис. И4*).

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 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. И7а*). По сути жидкость должна достичь выходной кромки листа (*поз. 44*), но, достигая прорези в листе, она меняет своё направление, стекая внутрь кассеты. Помимо прорезей было предложено исполнение со специальными лентами (*рис. И7б*), которые также предотвращают унос влаги потоком воздуха.

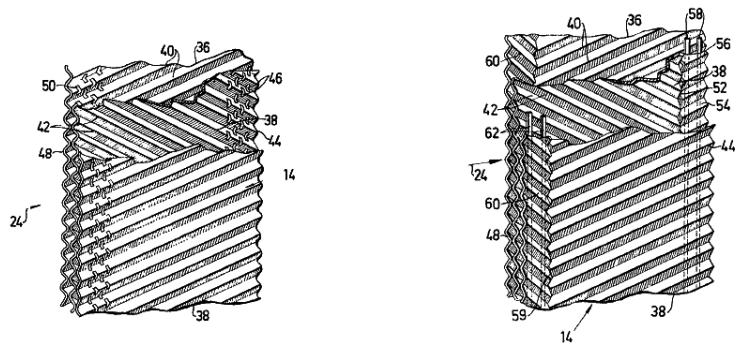


Рис. И7. Испарительная кассета: а) в исполнении с прорезями; б) в исполнении с лентами

Важно отметить, что в охладительных установках испарительного типа необходимо, чтобы листы хорошо впитывали влагу, например, с помощью специальных пропиток (фенолоальдегидная смола и др.). Однако на краевых участках, где расположены прорези (*рис. И7а, поз. 46 и 50*) и полосы (*рис. И7б, поз. 54 и 60*), наоборот, выгодно, чтобы листы не впитывали жидкость под действием капиллярной силы, поскольку здесь не происходит очистки путём промывки жидкостью, так что непрерывное испарение жидкости приведёт 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.

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 университета, 2010. – 151 с.

4. Komuro T., Ito E., Sonoda T., Tomita Y., Hidaka K., Shibutani S. Power output of gas turbine combined cycle by in let-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, june 3–6, 2002, ASME Paper No: GT-2002-30560.

7. De Lucia M., Bronconi R., 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. – 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 производ-

ственном 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. Дисс. ... 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 парокомпрессионных и воздушных холодильных машин / В. М. Бродянский, Е. Н. Серова, И. М. Калнинь // Холодильная техника. – 1999. – № 11–12.

Глава 2

1. Жохов В. Л., Ленев С. Н., Фролов А. В. Первые результаты внедрения охладительных установок испарительного типа циклового воздуха энергетических ГТУ в ПАО «Мосэнерго» // Новое в российской электроэнергетике. – 2021. – № 1. – С. 34–45.

2. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. – М.; Энергоатомиздат, 1983.

Глава 3

1. Жохов В. Л., Ленев 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., Ленев С. Н., Фролов А. В. Первые результаты внедрения охладительных установок испарительного типа циклового воздуха энергетических ГТУ в ПАО «Мосэнерго» // Новое в российской электроэнергетике.– 2021. – № 1. – С. 34–45.

3. Siemens industrial turbomachinery AB. Product improvement bulletin. Improvement of air filter efficiency. – 2010-03-12.

4. Жохов В. Л., Ленев С. Н. О необходимости включения требования по определению водостойкости воздушных фильтров в стандарт // Новое в российской электроэнергетике. – 2019. – № 2. – С. 16–24.

5. Голов П. В., Жохов В. Л., Ленев С. Н. Новые рекомендации производителя КВОУ компании FAIST AIS для воздушных фильтров // Газотурбинные технологии. – 2017. – № 1. – С. 10–13.

6. Голов П. В., Жохов В. Л, Ленев 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., Ленев С. Н., Фролов А. В. Первые результаты внедрения охладительных установок испарительного типа циклового воздуха энергетических ГТУ в ПАО «Мосэнерго» // Новое в российской электроэнергетике.- 2021. – № 1. – С. 34–45.

2. Жохов В. Л., Ленев С. Н. Мониторинг параметров циклового воздуха на всасе энергетических ГТУ с охладительными установками испарительного типа // Новое в российской электроэнергетике. – 2021. – № 2. – С. 6–19.

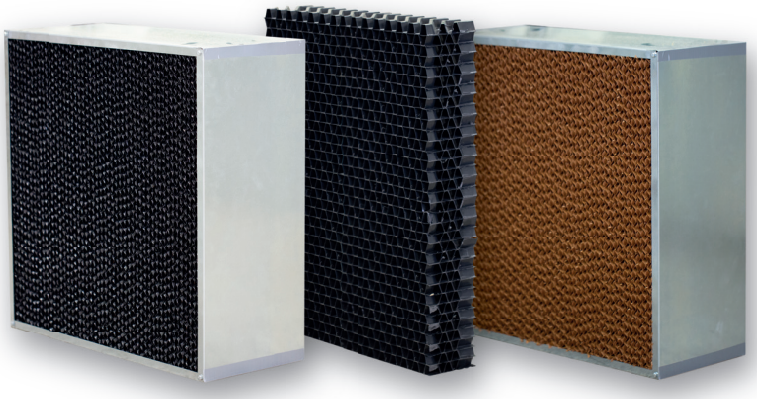
3. Жохов В. Л., Ленев С. Н. Система мониторинга параметров циклового воздуха в охладительной установке испарительного типа и КВОУ энергетической ГТУ // Газотурбинные технологии. – 2021. – № 5. – С. 38–42.

4. Жохов В. Л. Рейтинг загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ // Газотурбинные технологии. – 2019. – № 2. – С. 42–46.

HuPad-GT

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 ◄●► **СОКРАЩЕНИЕ РАСХОДОВ НА ТОПЛИВО**

СНИЖЕНИЕ ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ ◄●► **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 не только повышает энергоэффективность турбины, но и снижает износ оборудования, продлевая его срок службы.

HuPad-GT обладает высокой устойчивостью к коррозии 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.

+7 (495) 909-21-01
zakaz@hupad.ru
www.hupad.ru

СДЕЛАНО В РОССИИ

группа компаний
ВОЗДУШНЫЕ
ФИЛЬТРЫ
FILTERS.RU

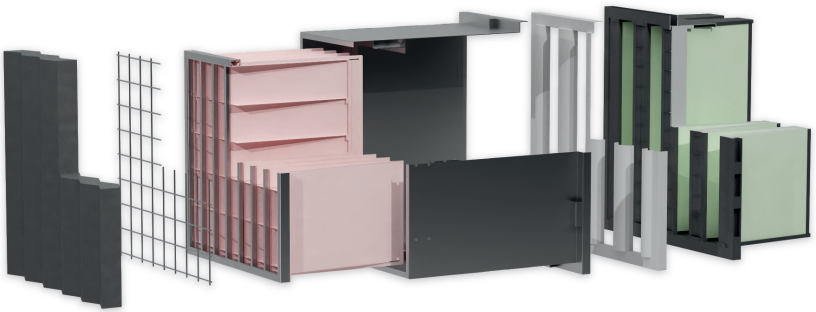
Готовые решения

по повышению энергоэффективности газотурбинного оборудования

Мы предлагаем комплексные решения, специально разработанные для оптимизации работы газотурбинного оборудования.

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 *Одинцова И. А.*
Корректор *Смирнов В. В.*

Подписано в печать 00.10.23 г. Формат 60×90/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 00,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 00000/23.

ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии»
Россия, 152901, Ярославская обл., г. Рыбинск,
ул. Ломоносова, д. 30а
Тел.: (4855) 295-235, 295-236
E-mail: info@gtt.ru. www.gtt.ru

Отпечатано в типографии
ООО «Тверской печатный двор»
Россия, 170518, Тверская обл., Калининский р-н, с. Никольское, д. 26

ISBN 978-5-6045651-2-4