

УДК 621.135

Артем Дмитриевич Водениктов

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», аспирант кафедры атомных и тепловых электрических станций, Россия, Казань, e-mail: Vodhan@mail.ru

Валерий Георгиевич Власенко

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», инженер, Россия, Казань, e-mail: vv6300@yandex.ru

Наталья Дмитриевна Чичирова

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой атомных и тепловых электрических станций, Россия, Казань, e-mail: ndchichirova@mail.ru

Повышение эффективности поиска присосов в вакуумную систему с помощью комбинированных методов

Авторское резюме

Состояние вопроса. Безаварийная работа основного оборудования тепловых электростанций определяется надежностью работы конденсационных установок. Обеспечение высокой воздушной плотности вакуумной системы позволяет добиться экономичной и надежной эксплуатации. Одной из причин, вызывающих рост давления отработавшего пара по сравнению с нормативным, кроме загрязнения охлаждающей поверхности конденсаторов, является высокая величина присосов атмосферного воздуха через неплотности в вакуумной системе. Превышение величины присосов атмосферного воздуха в вакуумную систему сверх нормативного значения не только уменьшает располагаемый теплотеплоперепад, но и ухудшает деаэрационную способность конденсатора, что приводит к насыщению основного конденсата кислородом и интенсификации коррозионных процессов. Для поиска и локализации мест присосов используются различные методы, различающиеся как величиной затрат, так и эффективностью. В настоящее время остается открытым вопрос выбора способа отыскания мест присосов в вакуумную систему паровой турбины, позволяющего обнаруживать даже самые незначительные места разгерметизации.

Материалы и методы. При выполнении работы использованы тепловизионный метод, позволяющий отыскивать места присосов за счет локальных переохладений, и ультразвуковой метод, в основе которого лежит фиксация ультразвука, создаваемого потоками газов.

Результаты. Показана необходимость использования нескольких методов поиска неплотностей в вакуумной системе, различающихся принципом действия. Установлено, что использование традиционных способов поиска неплотностей вакуумной системы не позволяет устранить сверхнормативные присосы. Снижение величины присосов на 87 % подтверждено эксплуатационным контролем.

Выводы. Проведенные исследования показывают высокую эффективность тепловизионного и ультразвукового методов поиска присосов в вакуумную систему, которая может быть увеличена при их совместном использовании. Исходя из условий эксплуатации имеющегося оборудования, а также квалификации персонала, полученные результаты позволяют выбрать наиболее оптимальный с точки зрения финансовых и временных затрат способ поиска мест присосов в вакуумную систему паровой турбины.

Ключевые слова: конденсатор, присосы, паровая турбина, вакуумная система, разгерметизация

Artyom Dmitrievich Vodenikov

Kazan State Power Engineering University, PhD student of Nuclear and Heat Power Plants Department, Russia, Kazan, e-mail: Vodhan@mail.ru

Valerii Georgievich Vlasenko

Kazan State Power Engineering University, Engineer, Russia, Kazan, e-mail: vv6300@yandex.ru

Natalia Dmitrievna Chichirova

Kazan State Power Engineering University, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of Nuclear and Heat Power Plants Department, Russia, Kazan, e-mail: ndchichirova@mail.ru

Improvement of efficiency of detecting vacuum leakages by using combined methods

Abstract

Background. Trouble-free operation of the main equipment of heat power plants is determined by the performance reliability of condensing units. High air density of the vacuum system provides cost-effective and reliable operation. One of the reasons that causes an increase of the exhaust steam pressure compared to the standard pressure, in addition to contamination of the condensers cooling surface, is the high amount of air inflow through vacuum system leakiness. Exceeding the amount of atmospheric air inflow into the vacuum system above the standard value, both reduces the available heat energy and make worse the deaeration capacity of the condenser. This results in saturation of the full-flow condensate with oxygen and intensification of corrosion processes. Various methods varying in both cost and efficiency are used to find air inflow location. Nowadays, the issue of choosing a method to detect even the most insignificant air inflow location of the vacuum system of a steam turbine remains open.

Materials and methods. In the current study, the authors have used the thermal-imaging method to detect air inflow location due to local hypocoiling, and the ultrasonic method, which is based on the detection of ultrasound created by gas flows.

Results. The authors have proved the necessity to use several different in concept methods to find leakage locations in a vacuum system. It is established that traditional methods to find vacuum system leaks do not allow to eliminate excess leaks. In-service monitoring confirms 87 % reduction of the amount of vacuum leaks.

Conclusions. The studies show high efficiency of sharing both thermal imaging and ultrasonic methods to detect air inflow location in a vacuum system. According to the operating conditions of the available equipment, as well as the personnel qualifications, the results obtained make it possible to choose the most optimal way in terms of financial and time expenses to find vacuum leakage location in the vacuum system of a steam turbine.

Key words: condenser, air inflow, steam turbine, vacuum system, leakage

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.3.013-021

Введение. Поиск мест присосов воздуха в вакуумную систему паровых турбин на протяжении десятилетий является актуальной проблемой для персонала тепловых электростанций. Оперативное устранение неплотностей позволяет повысить экономичность и надежность работы паротурбинной установки.

Согласно правилам технической эксплуатации¹, величина присосов воздуха в диапазоне изменения паровой нагрузки конденсатора от 40 до 100 % должна быть не выше значений, определяемых по формуле $G_b = 8 + 0,065 \cdot N$, (1) где N – номинальная электрическая мощность турбоустановки на конденсационном режиме, МВт.

Несмотря на то, что производительность воздухоудаляющих устройств конденсационных установок паровых турбин выбирается со значительным запасом, при уменьшении воздушной плотности вакуумной системы происходит снижение экономичности турбоустановки, в первую очередь из-за понижения разряжения в конденсаторе.

Так, при увеличении присосов воздуха сверх нормативного значения ухудшаются условия теплообмена в конденсаторе, что ведет к ухудшению вакуума и переохлаждению конденсата. При росте давления отработавшего пара в конденсаторе растет его энтальпия и, как следствие, уменьшается располагаемый теплоперепад, что ведет к снижению мощности и экономичности паротурбинной установки. С ростом переохлаждения конденсата происходит его насыщение кислородом, который является катализатором коррозионных процессов трубной системы регенерации низкого давления со стороны основного конденсата. Унос продуктов коррозии в котел снижает его эффективность и надежность, что увеличивает риск пережога поверхностей нагрева котла [1].

При исправных эжекторах и вакуумных насосах, работающих без перегрузки, величина снижения вакуума в конденсаторе в результате увеличения количества проникающего воздуха в вакуумную систему определяется только объемной производительностью эжектора.

В табл. 1 приведены величины понижения вакуума в конденсаторе при увеличении присосов воздуха на 10 кг/ч для не-

¹ Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – М.: ОРГРЭС, 2003.

которых пароструйных эжекторов, имеющих различные объемные производительности в режимах без перегрузки.

Таблица 1. **Взаимосвязь величины понижения вакуума в конденсаторе и модели эжектора**

Тип эжектора	Объемная производительность, м ³ /ч	Понижение вакуума в конденсаторе на каждые 10 кг/ч воздуха, ат*ч/10 кг
Э-1-Б, ЛМЗ	860	0,005
ЭО-30, КТЗ	865	0,005
ЭО-50, КТЗ	1140	0,004
ЭП-2-400, ЛМЗ	1500	0,003
ЭП-3-600, ЛМЗ	3000	0,0015

Анализ табличных данных показывает, что для эжектора ЭО-50, КТЗ присос воздуха 25 кг/ч вызывает увеличение давления в конденсаторе на 0,01 ат. В случае, если присос воздуха вызовет перегрузку эжектора, понижение вакуума будет более значительным.

В [2] рассмотрена взаимосвязь величины присосов воздуха и роста удельного расхода топлива для турбин различной

Таблица 2. **Влияние присосов воздуха в вакуумную систему паровой турбины на перерасход топлива**

Параметр	Мощность турбины, МВт					
	12	25	50	100	200	300
Предельный присос воздуха, кг/ч	8,8	9,6	11,3	14,5	21	27,5
На каждые 10 кг/ч присосов воздуха:						
– снижение мощности, кВт	92	107	170	255	254	127
– рост удельного расхода топлива, г/(кВт·ч)	4,15	1,99	1,42	1,06	0,5	0,14
– годовой перерасход условного топлива за 6000 ч при работе на полной нагрузке, т	31	54	97	191	362	250

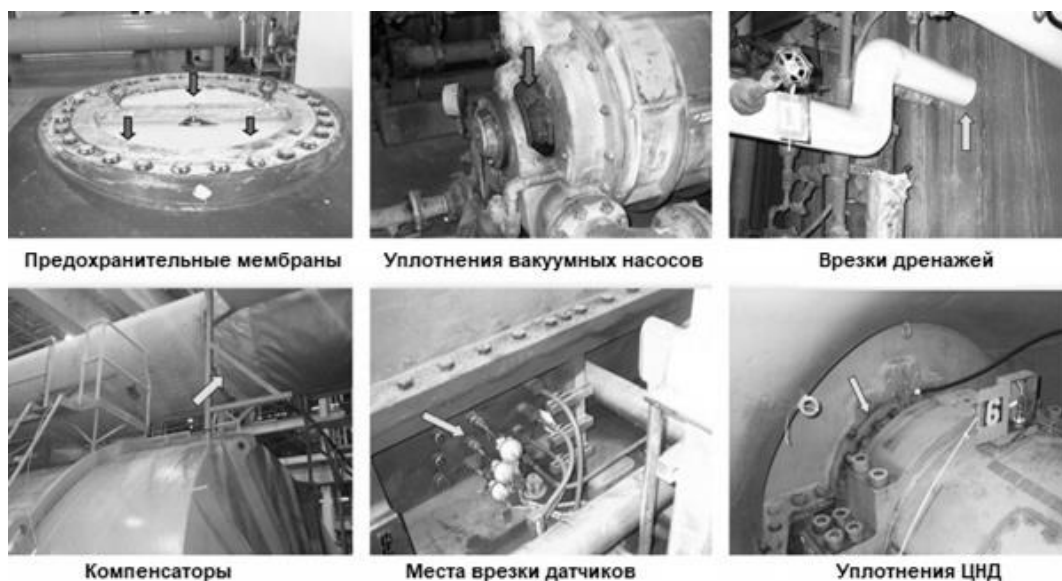


Рис. 1. Места, наиболее часто подверженные разгерметизации

мощности. Данные о влиянии присосов воздуха на рост удельного расхода топлива приведены в табл. 2.

Анализ приведенных в табл. 2 данных показывает, что устранение неплотностей в вакуумной системе паровой турбины позволит снизить удельный расход топлива, а в случае необходимости – получить прирост мощности при аналогичном расходе топлива. Таким образом, поиск присосов является экономически целесообразным мероприятием. Однако его эффективность во многом зависит от методов, используемых при поиске мест неплотностей.

На сегодняшний день существует множество способов, позволяющих локализовать места неплотностей в вакуумной системе паровых турбин. Особенно востребованы способы отыскания присосов на работающей турбине, так как их использование позволяет избежать вынужденных простоев и, как следствие, связанных с этим финансовых потерь. Перечень наиболее часто встречающихся мест разгерметизации представлен на рис. 1.

Одним из самых старых способов поиска присосов является использование легкой нити или пламени свечи и расположение их возле предполагаемых мест присосов. По отклонению положения индикатора вследствие создаваемого разряжения определялось место присоса. Такой способ является устаревшим и не позволяет обнаружить места разгерметизации, имеющие незначительные размеры.

В отечественной и зарубежной литературе также описывается способ поиска неплотностей с использованием инертного газа². Этот способ основан на распылении инертных газов у потенциальных мест присосов и последующей их индикации в паровоздушной смеси, отсасываемой эжектором или вакуумным насосом.

Для обнаружения источника присоса воздуха используются индикаторные газы, два из которых наиболее распространены – гелий и гексафторид серы (SF₆). Гексафторид впервые был эффективно использован в качестве индикаторного газа в воздухе при исследованиях атмосферы и продемонстрировал свою большую чувствительность в качестве индикаторного газа. Гексафторид серы, открытый в 1900 году, представляет собой бесцветный, безвкусный и негорючий газ, практически инертный с химической и биологической точек зрения. Он не вступает в реакцию с водой, едким калием или сильными кислотами и может нагреваться до 500 °С без разложения. Основным свойством SF₆ является то, что он может быть обнаружен в очень низких концентрациях – 00,1 ppb (самая низкая обнаруживаемая концентрация гелия составляет 1000 ppb). Это позволяет обнаруживать даже самые незначительные неплотности в вакуумной системе.

При использовании пароструйных эжекторов индикатор инертного газа устанавливается в месте удаления паровоздушной смеси, позволяя без особых проблем улавливать газ-индикатор. Однако на сегодняшний день на ТЭС России способ с использованием газов практически не применяется.

Достоинствами этого способа являются:

- достаточная точность определения места присоса при условии физической доступности к нему;

- при затрудненном доступе к конкретному месту оборудования возможность локализовать зону наличия присоса для дальнейшего поиска дефекта другими способами;

- возможность выявлять потенциально возможные неплотности в элементах вакуумной системы без предварительного демонтажа тепловой изоляции.

Недостатки способа:

- зависимость от местных условий – неорганизованных потоков внешней среды, что может вызываться изменением состава работающего оборудования (например, переключением вентиляционных установок помещения, насосов, воздушным охлаждением двигателей и т.д., что негативно влияет на повторяемость результата, а также повышает вероятность ошибочных выводов о наличии либо отсутствии дефекта на обследуемом элементе);

- большая задержка по времени от обдувки элемента до появления сигнала на приборе, которая, в зависимости от места расположения элемента, может достигать 3 минуты и более и, учитывая необходимость 2–3 дополнительных контрольных обдувок, ведет к значительным затратам рабочего времени персонала;

- значительное количество расходного материала и необходимость его постоянного пополнения (фреон, гелий, гексафторид серы).

В [3] описан способ обнаружения мест разгерметизации в вакуумной системе с помощью приборного контроля. Данный способ основан на установке дополнительных кислородомеров (рис. 2) в систему регенерации низкого давления. Датчиками кислородомеров измеряется содержание кислорода в конденсате теплообменников, работающих под разрежением, например за конденсатными насосами конденсатора турбины, нижнего и верхнего сетевых подогревателей, подогревателя добавочной воды. Места присосов воздуха определяются по абсолютным величинам показаний датчиков многоканальных кислородомеров и по разности этих показаний.

Данный способ определения мест присосов является косвенным и не позволяет локализовать место присоса с достаточной точностью. Кроме того, места установки кислородомеров являются потенци-

² Condenser Performance Monitoring Practices. EPRI. 2002.

альными местами разгерметизации и последующего насыщения конденсата кислородом. Авторы этого способа утверждают, что он позволяет быстрее локализовать места неплотностей, чем галоидный течеискатель. Однако его эффективность видится сомнительной, ввиду невозможности точно локализовать место присоса. Как показывает опыт эксплуатации, изменение качества основного конденсата (а именно, рост концентрации растворенного кислорода) может быть вызвано не только ростом величины присосов воздуха, но и режимом работы турбоустановки.

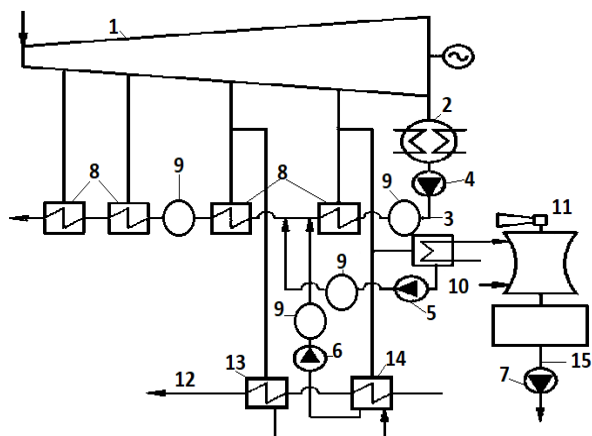


Рис. 2. Схема оперативного приборного контроля мест присосов воздуха в вакуумную систему турбоустановки: 1 – паровая турбина; 2 – конденсатор; 3 – трубопровод основного конденсата турбины; 4, 5, 6, 7 – насосы; 8 – регенеративные подогреватели низкого давления; 9 – датчики концентрации растворенного кислорода; 10 – подогреватель исходной воды; 11 – вакуумный деаэрактор; 12 – теплосеть; 13, 14 – верхний и нижний сетевые подогреватели

Анализ существующих способов поиска мест присосов показывает, что используемые сегодня способы поиска присосов не позволяют локализовать места присосов с достаточной точностью. Таким образом, вопрос повышения эффективности существующих способов и разработки новых остается актуальным.

Методы исследования. Для проведения работ по отысканию присосов были выбраны два наиболее современных метода, использующие, однако, кардинально разные способы обнаружения подсоса воздуха.

Одним из популярных в зарубежной энергетике методов поиска присосов является ультразвуковой метод. Как следует

из названия, принцип работы ультразвуковых течеискателей основан на распознавании ультразвука, создаваемого потоками газов. С помощью процесса, называемого гетеродинингом, ультразвуковые детекторы присосов переводят ультразвуковой шипящий звук на более низкую частоту, где его можно услышать через наушники. По мере приближения к источнику шума звук становится громче, что и позволяет локализовать неплотность. Стоит отметить, что любой турбулентный поток газа генерирует ультразвук, поэтому не имеет значения, какая система проверяется на герметичность. Ультразвуковой детектор позволяет обнаружить как истечения воздуха, азота или хладагента в атмосферу, так и присосы воздуха в вакуумную систему паровой турбины.

Использование ультразвукового течеискателя возможно для отыскания присосов воздуха только в элементы, имеющие прямой доступ к устройству: сальники вентилей и задвижек, фланцевые соединения, уплотнения крышек и люков.

Достоинства ультразвукового метода:

- позволяет определить локальные места присосов воздуха в элементы;
- позволяет провести обследование значительных объемов в короткие сроки;
- обследование может проводить один инженер-наладчик.

Недостатками метода являются:

- возможность обследования только тех элементов, к которым имеется непосредственный доступ.
- ошибки в связи с наличием сильного фонового шума в эксплуатационном режиме работы электростанции.

С начала 2000-х годов начинается активное использование тепловизоров для обнаружения мест присосов в оборудовании, работающем под разрежением. Опыт использования данного способа описан как в отечественной [4], так и в иностранной литературе [5]. Элементы вакуумной системы (стенки конденсатора, трубы, вентили и т.д.) имеют температуры выше, чем температура окружающего воздуха в цеху. Поток воздуха, поступающего через неплотность, воздействует на нагретые поверхности. За счет охлаждения металла в местах присосов наблюдается локальное охлаждение, которое можно обнаружить с помощью тепловизора (рис. 3) [5].

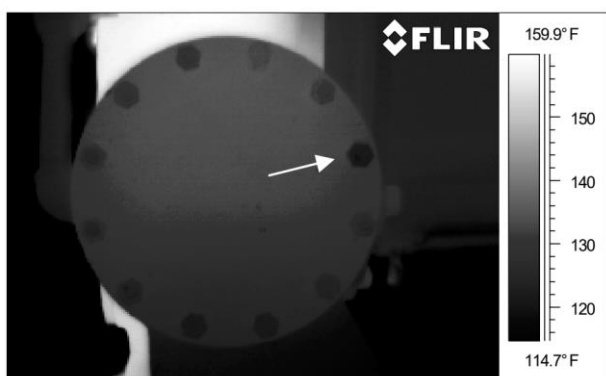


Рис. 3. Термограмма вакуумного насоса (стрелкой указан болт, создающий присос воздуха)

Данный метод может уверенно использоваться не только для конкретного места присоса, но и позволяет первоначально выявить участок, на котором присос присутствует. Например, тепловизионная съемка трубопровода удаления паровоздушной смеси из подогревателя низкого давления в конденсатор (либо нижерасположенный подогреватель) позволяет констатировать факт отсутствия либо наличия присоса в отбор при текущей нагрузке турбины.

Успешность выявления присосов через элементы толстостенных деталей, таких как различные фланцевые разъемы, слабо зависит от указанного выше механизма и больше – от разности температур рабочей среды элемента и окружающей среды. Выявление присосов в элементы импульсных линий таким методом затруднено из-за того, что температуры импульсной линии и ее элементов, находящихся под разряжением, всегда равны температуре окружающей среды.

Для успешного использования данного метода полезно предварительно составить тепловизионную карту элементов турбины с последующим периодическим отслеживанием изменений, однако данное мероприятие требует дополнительного привлечения значительных трудовых ресурсов.

Достоинства этого метода:

- позволяет определить локальные места присосов воздуха в элементы, а также ограничено может использоваться для предварительного определения участков вакуумной системы, в которые происходит присос воздуха;

- позволяет провести обследование значительных объемов в короткие сроки одним инженером-наладчиком;

- позволяет обследовать участки вакуумной системы, находящиеся в зоне визуального контакта, но не имеющие непосредственного доступа.

Недостатки метода:

- возможность обследования только участков с отсутствием тепловой изоляции;

- высокая чувствительность к градиентам температур, обуславливающая суть использования метода, нередко приводит к ложным выводам о наличии присоса из-за разной толщины окрасочного слоя одного элемента, наличия загрязнений либо даже цвета или типа окраски соседних участков.

Ультразвуковой и тепловизионный способы являются наиболее современными способами поиска неплотностей, позволяющих обнаруживать как утечки газов, так и подсосы воздуха. Для апробации данных способов поиска было использовано следующее оборудование:

- тепловизор Testo 890 с размером детектора 640×480 пикселей и диапазоном измерения температур от –30 до +650 °С;

- ультразвуковой детектор утечки SONAPHONE-R с диапазоном ультразвуковых частот от 20 до 100 кГц.

Результаты исследования. Для оценки эффективности использования вышеописанных методов был произведен поиск присосов в вакуумную систему паровой турбины К-210-130 ЛМЗ. Энергоблок был введен в эксплуатацию в 1978 году. Последний капитальный ремонт выполнен в 2015 году.

Необходимость поиска неплотностей была вызвана неудовлетворительным состоянием вакуумной системы, к тому же после пуска энергоблока наблюдалась тенденция к росту величины присосов с 66,5 до 114 кг/ч.

Первым подготовительным этапом была проверка сальников задвижек трубопроводов и водоуказательных стекол, находящихся под разряжением. Для улучшения плотности вышеобозначенных узлов вакуумной системы была произведена их обмазка [6]. В результате величина присосов воздуха в вакуумную систему снизилась со 114 до 90 кг/ч.

С учетом существующих рекомендаций³ было выбрано два основных способа обнаружения неплотностей вакуумной системы – тепловизионный и ультразвуковой. Использование одновременно двух приборов, работающих по разным принципам, позволяет наиболее точно локализовать места присосов.

Как отмечено в [2], около 60 % присосов в вакуумную систему паровой турбины проникает через лабиринты концевых уплотнений. Для оценки степени влияния данного фактора была выполнена регулировка подачи пара к концевым уплотнениям турбины.

Так как в первоначальной схеме концевых уплотнений на линиях удаления паровоздушнoй смеси в подогреватель ПС-50 не была предусмотрена арматура для подрегулировки давления в камерах уплотнений, а также отсутствовали манометры, врезанные в сами камеры либо в непосредственной близости от них, то была установлена недостающая арматура и КИП. Давление в камерах уплотнений должно контролироваться в целях соблюдения требований завода-изготовителя о его поддержании на уровне $0,03 \text{ кгс/см}^2$ для исключения проскока воздуха в конденсатор или выбивания пара через уплотнения.

Так как ранее контроль давления и возможность индивидуальной его подрегулировки непосредственно в камерах отсутствовали, то после проведения пробной настройки после пуска блока было выявлено, что давление в камерах поддерживалось с большим избытком. Мероприятие не привело к снижению присосов воздуха, однако его внедрение позволило избавиться от излишнего пропаривания через концевые уплотнения и исключило возможность обводнения масла в системе смазки турбины по этой причине.

Полученные результаты позволили сделать вывод, что основная масса присосов воздуха создается неплотностями в разъемах и свищах, а не уплотнениями.

Далее было проведено обследование вакуумной системы с помощью гелиевого течеискателя. Обследование проводилось неоднократно на работающей под нагрузкой турбине в диапазоне 40–100 % нагрузки. Предварительно проведено опробование работоспособности метода путем орга-

низации искусственного присоса воздуха, подачи в присос гелия и фиксирования результата на выхлопе из парового эжектора.

Метод показал свою работоспособность, однако задержка сигнала от подачи гелия до фиксирования его появления составляла 2–4 минуты, что в последующем в реальных условиях не позволило отыскать этим методом ни одного дефекта. Также отмечалось, что этим методом можно отыскать потенциальный район расположения дефекта, но локализовать конкретное место невозможно.

На нагрузке 90 МВт проведена последовательная опрессовка расширителей дренажей турбины и сбросных трубопроводов промперегрева и БРОУ, показавшая отсутствие дефектов на обследуемых участках.

Затем было проведено ультразвуковое обследование сальников арматуры, насосов, фланцевых соединений. Из-за сильных наводок шумов от движущегося в паропроводах пара при работе турбины дефекты были определены только на отдельных участках, расположенных вдали от паропроводов, а также в сальниках сливных насосов.

Проведено тепловизионное обследование, которое позволило определить проблемные локальные участки с возможными присосами воздуха. Также в процессе тепловизионного обследования было выявлено, что существенное количество воздуха в конденсатор идет через трубопровод удаления ПВС от ПНД-1, при этом температура указанного трубопровода за установленной дроссельной шайбой оказалась существенно ниже температуры выхлопа конденсатора ($18 \text{ }^\circ\text{C}$ при температуре выхлопа $24 \text{ }^\circ\text{C}$), что и являлось свидетельством низкого парциального давления пара в удаляемой от ПНД-1 ПВС.

Далее при обследовании было выявлено, что воздух поступает непосредственно по паропроводу отбора пара на ПНД-1, что выявилось существенной разницей температуры металла паропровода по его высоте: температура отдельных участков составляла от 60 до $81 \text{ }^\circ\text{C}$ при нормативной $65 \text{ }^\circ\text{C}$ (наличие участков паропровода с температурой пара выше нормативной обусловлено неудовлетворительным состоянием надбандажных уплотнений ступеней ротора ЦНД перед выходом в капитальный ремонт). Так как разница темпера-

³ Condenser Performance Monitoring Practices. EPRI. 2002.

тур оказалась существенной, то данный замер был продублирован пирометром, в результате была подтверждена его правильность. Также были обнаружены потенциальные места присосов воздуха через горизонтальные фланцевые разъемы ЦНД и в месте примыкания горизонтального и вертикального фланцевых разъемов, а также под накидными гайками шпилек горизонтального разъема.

Перед выводом блока в ремонт был выполнен набор вакуума на остановленной турбине, с помощью ультразвукового теческатора было определено, какие из дефектов, выявленные тепловизором, действительно являются присосами, а какие градиенты температур вызывались иными причинами. Также дополнительно было проведено сплошное обследование всех сальников и фланцевых соединений арматуры. В частности, был подтвержден дефект в месте примыкания горизонтального и вертикального разъемов фланцев ЦНД (рис. 4). Локальное переохлаждение на данном участке составило 0,9 °С. Данный случай подтверждает информацию, что зачастую локальное переохлаждение составляет десятые доли градуса [5].

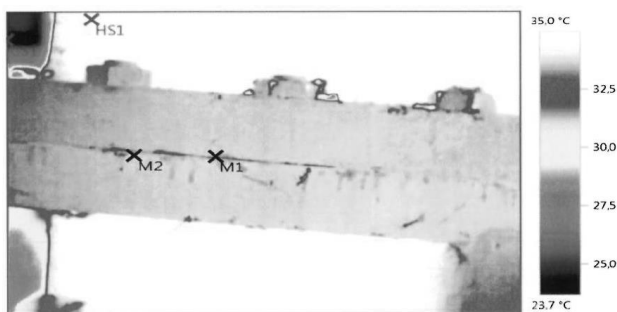


Рис. 4. Присос в области фланцевого разъема

После остывания турбины до холодного состояния перед выводом энергоблока в ремонт проведена заливка вакуумной системы до отметки обслуживания турбины. Выявлены дефекты, расположенные ниже отметки обслуживания, в том числе по протечкам из-под тепловой изоляции с ее вскрытием и локализацией мест дефектов. Основные дефекты, которые определены таким способом, – свищи в сварных швах трубопроводов, тройниках и отводах трубопроводов, а также на наклонных стенках конденсаторов, что свидетельствовало о наличии дефектов компенсаторов (рис. 5).

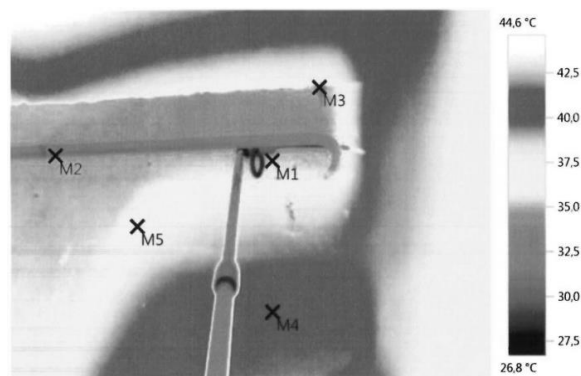


Рис. 5. Термограмма компенсатора на наклонной стенке конденсатора

Анализ термограммы показал локальное переохлаждение в районе сварных швов защитного листа компенсатора. Наиболее холодные точки (M2 и M3) имели температуру 31 °С, в то время как средняя температура металла рассматриваемого участка составляла 37 °С.

При вскрытии ЦНД турбины был проведен внутренний осмотр вертикальных разъемов корпуса, в процессе которого выявлено, что уплотнительный материал, примененный при монтаже турбины для вертикального разъема, потерял свои свойства и выкрошился, что и явилось причиной поступления значительного количества воздуха в последний отбор турбины, где конструктивно и расположен указанный фланцевый разъем.

После выявления дефекта был также обследован вертикальный фланцевый разъем ЦСД, где наблюдалась аналогичная картина, по причине чего и происходило увеличение времени набора вакуума при пуске турбины вплоть до взятия электрической нагрузки и повышения давления на выхлопе ЦСД выше атмосферного.

По согласованию с заводом-изготовителем, учитывая, что данные вертикальные разъемы используются только при первичной сборке турбины и не требуются их разбалчивания при дальнейших ремонтах и эксплуатации, было принято техническое решение о сплошной обварке изнутри данных соединений.

Выводы. Анализ полученных результатов показывает, что все использованные методы позволяют находить места присосов, при этом на эффективность локализации влияет ряд эксплуатационных факторов. Однако наиболее эффективным методом можно считать тепловизионный. Он не требует специального длительного обуче-

ния персонала, отличается низкими трудовыми затратами и требует привлечения лишь одного специалиста.

По общим результатам проведенной работы, присосы воздуха в вакуумную систему удалось снизить до величины 14,7 кг/ч, что составляет 70 % от значения, регламентируемого ПТЭ.

Список литературы

1. **Кирсанов И.Н.** Конденсационные установки. – М.: Энергия, 1965. – 376 с.
2. **Орлик В.Г., Аверкина Н.В., Носовицкий И.А.** Перерасход топлива из-за присосов воздуха в вакуумную систему паровых турбин // *Электрические станции*. – 2009. – № 11. – С. 1–12.
3. **Шарапов В.И., Замалеев М.М., Кудрявцева Е.В.** Способы обнаружения мест разгерметизации теплоэнергетического оборудования, работающего под вакуумом // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. – 2015. – № 3–4. – С. 3–10.
4. **Метод** обнаружения присосов воздуха в котлах и турбинах с помощью тепловизора / А.А. Авдеев, В.И. Жингель, А.П. Меркушов, Л.В. Кожевников // *Теплоэнергетика*. – 2007. – № 2. – С. 26–30.
5. **Ronald D.L.** Chasing vacuum leaks // *Inframation*. – 2002. – Vol. 3, issue 5.
6. **Фукс С.Н.** Гидравлическая и воздушная плотность конденсаторов паровых турбин. – М.: Энергия, 1967.

References

1. Kirsanov, I.N. *Kondensatsionnye ustanovki* [Condensing units]. Moscow: Energiya, 1965. 376 p.
2. Orlik, V.G., Averkina, N.V., Nosovitski, I.A. Pereraskhod topliva iz-za prisosov vozdukhа v vakuumnuyu sistemu parovykh turbin [Excessive fuel consumption due to air inflow into the vacuum system of steam turbines]. *Elektricheskie stantsii*, 2009, no. 11, pp. 1–12.
3. Sharapov, V.I., Zamaleev, M.M., Kudryavtseva, E.V. Sposoby obnaruzheniya mest razgermetizatsii teploenergeticheskogo oborudovaniya, rabotayushchego pod vakuuomom [Methods to detect depressurization of thermal power equipment operating under vacuum]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2015, no. 3–4, pp. 3–10.
4. Avdeev, A.A., Zhingel', V.I., Merkushev, A.P., Kozhevnikov, L.V. Metod obnaruzheniya prisosov vozdukhа v kotlakh i turbinakh s pomoshch'yu teplovizora [Method for detecting air leaks in boilers and turbines using a thermal camera]. *Teploenergetika*, 2007, no. 2, pp. 26–30.
5. Ronald, D.L. Chasing vacuum leaks. *Inframation*, 2002, vol. 3, issue 5.
6. Fuks, S.N. *Gidravlicheskaya i vozdushnaya plotnost' kondensatorov parovykh turbin* [Hydraulic and air density of steam turbine condensers]. Moscow: Energiya, 1967.