



УДК 621.311.22

СПОСОБЫ ОБНАРУЖЕНИЯ МЕСТ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО ПОД ВАКУУМОМ

В.И. ШАРАПОВ, М.М. ЗАМАЛЕЕВ, Е.В. КУДРЯВЦЕВА

Ульяновский государственный технический университет

Показана актуальность проблемы обеспечения герметичности вакуумных систем турбоустановок и вакуумных деаэраторов. Разработаны и успешно проверены в промышленной эксплуатации высокоэффективные приборные и бесприборные способы обнаружения мест присосов воздуха в оборудование, работающее под вакуумом, в том числе технологии постоянного мониторинга герметичности вакуумных систем турбин и связанного с турбинами вспомогательного оборудования.

Ключевые слова: вакуумная система турбоустановки, вакуумные деаэраторы, присосы воздуха, способы обнаружения негерметичности.

Практически на всех отечественных тепловых электростанциях весьма актуальна проблема обнаружения и устранения неплотностей вакуумных систем турбин и вакуумных деаэрационных установок.

В турбоустановках под вакуумом прежде всего работают: цилиндр низкого давления турбины, конденсатор, конденсатный насос, нижний, а в ряде режимов и верхний сетевые подогреватели, первые по ходу основного конденсата регенеративные подогреватели низкого давления.

Герметичность вакуумной системы турбоустановки существенно влияет на экономичность и надежность работы тепловой электростанции. Изменение мощности турбины и удельного расхода теплоты на турбоустановку при изменении давления на 1 кПа в конденсаторах теплофикационных турбин, работающих в конденсационном режиме, показаны в книге [1, стр. 180, табл. 5.1]. В среднем при изменении давления в конденсаторе на 1 кПа КПД турбоустановки изменяется на 1%.

Присосы воздуха не только влияют на давление в конденсаторе, но также являются причиной ухудшенного теплообмена в конденсаторах и других теплообменных аппаратах турбоустановки. Повышение парциального давления воздуха в паровоздушной смеси в конденсаторе ведет к переохлаждению конденсата пара, а также способствует переводу воздушных насосов в экстремальный, нерасчетный режим работы, что сказывается на эффективности всей конденсационной установки.

Существенное влияние присосы воздуха оказывают на интенсивность внутренней коррозии конденсатно-питательного тракта турбоустановки от конденсаторов до деаэратора питательной воды.

Одним из распространенных методов контроля воздушной плотности вакуумной системы является непосредственное измерение количества удаляемого эжектором воздуха, для чего на выхлопном патрубке пароструйного эжектора устанавливается дроссельный воздухомер. Данный метод малоэффективен и не применим для водоструйного эжектора [2].

© В.И. Шарпов, М.М. Замалеев, Е.В. Кудрявцева

Проблемы энергетики, 2015, № 3-4

Также используется метод оценки герметичности вакуумной системы по скорости снижения вакуума при отключении эжектора. Герметичность вакуумной системы считается хорошей, если скорость снижения вакуума составляет 0,26-0,39 кПа/мин, удовлетворительной – при скорости 0,39-0,52 кПа/мин [2]. Этот метод определения присосов воздуха является косвенным. Главный его недостаток, однако, заключается в опасности возникновения нерасчетных режимов работы турбоустановки при отключении эжекторов.

В Правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей (ПТЭ) [3] указаны допустимые количества присосов воздуха G_B , кг/ч, в турбоустановку. В зависимости от мощности турбины присосы в диапазоне паровых нагрузок конденсатора 40–100% не должны превышать значений, определяемых формулой

$$G_B = 8 + 0,065 \cdot N, \quad (1)$$

где N – мощность турбины, МВт. Графически зависимость допустимых присосов воздуха от мощности турбины представлена на рис. 1.

Значения допустимых присосов очень малы. В конденсатор турбины Т-100/120–130 на различных режимах поступает от 20 до 140 т/ч пара. Следовательно, присосы в среднем составляют от 0,011% до 0,075%, при этом они должны быть удалены из конденсатора сразу же пароструйным эжектором, иначе концентрация растворенного кислорода в конденсате за конденсатором может достигнуть значения в 160 мкг/дм³ при норме в 20 мкг/дм³.

Некоторые способы требуют для определения места присосов воздуха останова турбоустановки. Так, отыскание воздушных неплотностей в вакуумной системе на остановленном турбоагрегате может производиться путем опрессовки, точнее залива парового пространства конденсатора водой [4]. Такой способ весьма трудоемок и малоэффективен (вода не проникает через микротрещины).

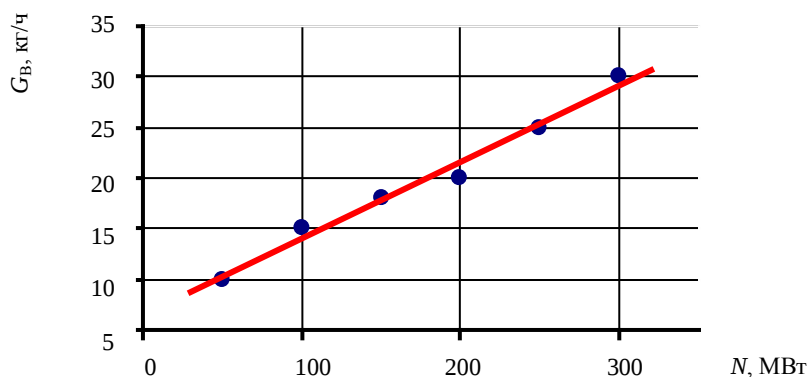


Рис. 1. Зависимость допустимого количества присосов воздуха от мощности турбоустановки (по ПТЭ [3])

Рассмотренные выше методы не учитывают присосов воздуха, которые происходят уже после конденсаторов в регенеративных и сетевых подогревателях, паропроводах этих подогревателей (особенно в компенсаторах паропроводов), насосах, линиях отбора проб, соединительных (импульсных) линиях к измерительным приборам и регуляторам, креплениях гильз, уплотнениях водоуказательных стекол и т.д., а значит, не могут дать полного представления о степени герметичности вакуумной

системы. Более того, эти методы не позволяют определить местонахождение присосов воздуха, без чего невозможно принимать оперативные меры по устранению присосов.

Отметим, что присосы воздуха в вакуумную систему сетевых и регенеративных подогревателей нередко приводят к весьма существенному ухудшению теплообмена, значительным недогревам сетевой воды и конденсата в этих теплообменниках и соответствующему снижению энергетической эффективности турбоустановки.

Присосы воздуха в вакуумных деаэрационных установках делают практически невозможной эффективную деаэрацию воды из-за несоблюдения режима соответствия температуры и давления (разрежения) насыщения в деаэраторах. Тем не менее, в печати практически отсутствуют работы, посвященные проблеме контроля и обеспечения герметичности вакуумных деаэрационных установок. В РТМ [5] рекомендуется опрессовка вакуумных деаэраторов водой, но она столь же неэффективна, как и водяная опрессовка конденсаторов турбин.

Для обнаружения мест присосов воздуха через неплотности различной арматуры конденсатно-питательного тракта могут использоваться галоидные течеискатели.

Проверяемые на герметичность места (фланцевые или сварные соединения, сальники арматуры и др.) обдуваются паром или газом, содержащим галоген. Обычно в качестве индикатора используются пары фреона, поступающие через шланг из переносного баллона с жидким фреоном. При наличии в обдуваемом месте неплотности фреон проникает внутрь системы и удаляется из нее вместе с паровоздушной смесью. Обычно отбираемая проба паровоздушной смеси сначала охлаждается в поверхностном теплообменнике для уменьшения содержания в ней водяного пара, а затем поступает в датчик. При наличии в пробе галогена в измерительном контуре возникает всплеск ионного тока, обнаруживаемый по показанию стрелочного прибора и звуковому сигналу [4].

Течеискатели – достаточно массивное оборудование (вес около 70 кг). Поскольку их применение связано с неоправданно большими трудозатратами, галоидные течеискатели не получили распространения на отечественных электростанциях.

В НИЛ «Теплоэнергетические системы и установки» УлГТУ предложено использовать для обнаружения мест присосов воздуха кислородомеры. Современные кислородомеры, прежде всего кислородомеры ООО «ВЗОР» (Нижний Новгород), достаточно надежны и точны, что позволяет использовать их для решения многих исследовательских и производственных задач [6].

Авторами разработаны технологии мониторинга герметичности вакуумной системы турбоустановки [7-10]. Технологии позволяют осуществлять непрерывный приборный контроль мест присосов воздуха с помощью многоканальных кислородомеров (рис. 2).

Датчики многоканального кислородомера (или нескольких одноканальных приборов) устанавливаются в различных точках конденсатно-питательного тракта турбоустановки после наиболее вероятных источников поступления в этот тракт кислорода с присосами воздуха, в частности, после регенеративных, сетевых и других подогревателей.

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.

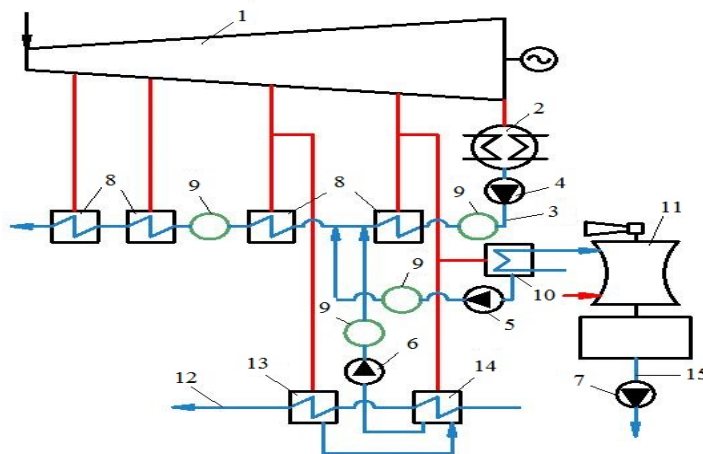


Рис. 2. Схема оперативного приборного контроля мест присосов воздуха в вакуумную систему турбоустановки [7-10]: 1 – паровая турбина; 2 – конденсатор; 3 – трубопровод основного конденсата турбины; 4, 5, 6, 7 – насосы; 8 – регенеративные подогреватели низкого давления; 9 – датчики кислородомера; 10 – подогреватель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

Стационарные кислородомеры целесообразно устанавливать на щитах управления турбинами. Благодаря непрерывному поступлению сведений о содержании кислорода в различных точках вакуумной системы турбоустановки, оперативный персонал постоянно владеет информацией о местах появления присосов воздуха и имеет возможность принять меры для немедленного устранения этих присосов.

В случае отсутствия многоканальных приборов можно использовать более распространенные одноканальные кислородомеры.

Количество присосов воздуха $D_{\text{возд}}$, г/ч, на участке с одинаковым расходом конденсата можно определить по показаниям кислородомеров следующим образом:

$$D_{\text{возд}} \approx 4,76 \cdot (G_{\text{к}2} - c^{\text{ст}}) \cdot c_{\text{к}} \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где c_1 , c_2 – концентрации кислорода по кислородомеру в точках замеров, мкг/дм³; $G_{\text{к}}$ – расход конденсата на участке, дм³/ч; 4,76 – коэффициент, учитывающий процентное содержание кислорода в воздухе; $c^{\text{ст}}$ – стабильная концентрация кислорода на участке (зависит от количества кислорода, расходующегося на растворение 1 г железа; стабильной концентрации кислорода на предыдущем участке; площади внутренней поверхности металла участка; объема участка; расхода конденсата на участках [11]).

При расчете присосов воздуха на участке величину $c^{\text{ст}}$ следует вычитать из определенного прироста содержания кислорода. Если за точку отсчета взять деаэратор, то данная величина будет принимать крайние значения перед ним и после него. В среднем можно принять, что $c^{\text{ст}} \approx (5 \div 10)$ мкг/дм³. Графически взаимосвязь показаний кислородомера на участке и количества присасываемого на данном участке воздуха показана на рис. 3.

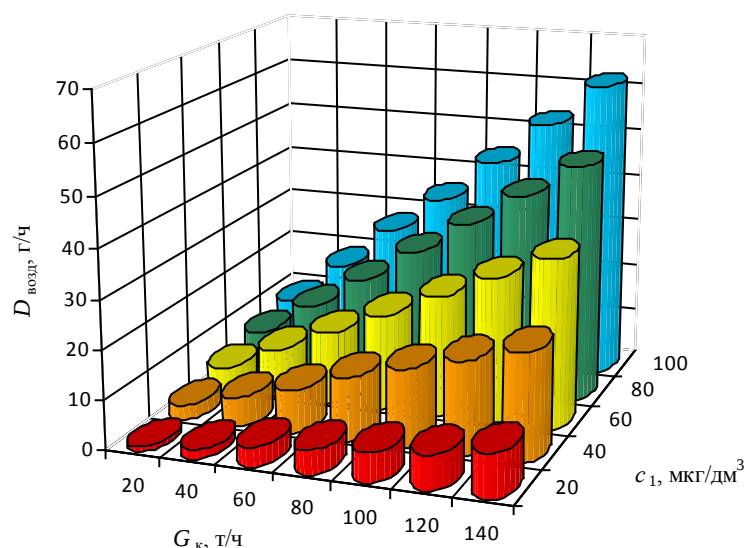


Рис. 3. Взаимосвязь показаний кислородомера на участке и количества присасываемого на данном участке воздуха

Если имеет место смешение потоков конденсата (рис. 4), то формулу (2) для определения присосов воздуха на участке 1 можно представить в виде

$$D_{\text{возд}} \approx 4,76 \cdot \left(c_1 - \frac{c_2 G_2}{G_2 + G_3} \right) \cdot (G_2 + G_3) \cdot 10^{-6}. \quad (3)$$

Первая опытная проверка новой технологии была проведена на турбоустановке Т-110-130 с помощью портативных кислородомеров МАРК-301Т. Выполнены замеры концентрации растворенного кислорода в различных точках конденсатно-питательного тракта турбоустановки. Выявлено, что в конденсате после нескольких теплообменников содержание кислорода превышает нормативную величину 20 мкг/дм³ [3]. Так в конденсате пара нижнего сетевого подогревателя содержание кислорода превышало 100 мкг/дм³. После оперативного уплотнения арматуры на конденсатопроводе перед конденсатным насосом содержание кислорода в конденсате после сетевого подогревателя снизилось до 18 мкг/дм³. Аналогичным образом были обнаружены и быстро устранены присосы воздуха на других участках вакуумной системы турбоустановки.

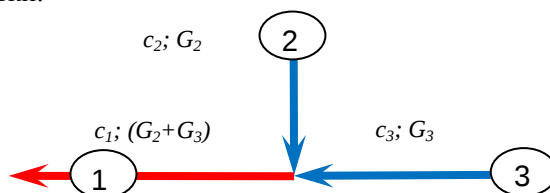


Рис. 4. Схема смешения потоков (к формуле (3))

Очевидно, что с применением ранее известных способов контроля герметичности вакуумных систем, например, с помощью галоидного течеискателя, столь оперативное обнаружение и устранение присосов воздуха невозможно.

Определение присосов воздуха по содержанию кислорода в потоках конденсата является, разумеется, косвенным. Так содержание кислорода в основном конденсате

турбины после конденсатора обусловлено не только величиной присосов в конденсатор, но и другими факторами, в частности деаэрирующей способностью конденсатора и величиной переохлаждения конденсата.

С другой стороны, наличие сверхнормативного содержания кислорода в конденсате вполне объективно указывает на чрезмерные присосы воздуха в вакуумную систему турбоустановки. Благодаря оперативности обнаружения мест присосов воздуха разработанные технологии мониторинга герметичности вакуумных систем [7-10] в настоящее время получили достаточно широкое распространение на тепловых электростанциях.

Интересно, что с помощью технологий [7-10] могут быть определены не только негерметичные участки вакуумной системы турбоустановки, но и отдельные несовершенства тепловой схемы турбоустановки. Так на одной из сибирских ТЭЦ при анализе результатов замеров содержания кислорода в различных участках конденсатно-питательного тракта нами выявлено грубейшее нарушение эксплуатационных инструкций завода-изготовителя турбин.

После того, как при помощи технологий [7-10] определен участок вакуумной системы, на котором происходит присос атмосферного воздуха, иногда следует другая задача: в каком именно элементе вакуумной системы возник этот присос. Наиболее трудно определяются и устраняются присосы в паровой части вакуумной системы турбоустановки. Для решения этой задачи целесообразна паровая опрессовка вакуумной системы.

Идея паровой опрессовки вакуумной системы возникла при исследовании работы вакуумной деаэрационной установки в атмосферном режиме (отметим, что серийно выпускаемые струйно-барботажные вакуумные деаэраторы конструкции ЦКТИ весьма эффективно работают в атмосферном режиме). При первой же постановке вакуумного деаэратора под незначительное избыточное давление обнаружились многочисленные неплотности вакуумной системы деаэрационной установки (в гильзах термометров, в арматуре, в местах подключения вакуумметров), которые не удалось обнаружить при рекомендуемом РТМ [5] гидравлическом испытании деаэратора. В дальнейшем этот эффект был запатентован [12] и стал широко использоваться нами для оценки герметичности вакуумных деаэрационных установок на многих электростанциях страны.

Аналогичное решение предложено нами и успешно использовано для опрессовки вакуумных систем турбоустановок [13,14]. Очень важно, что при паровой опрессовке визуально обнаруживаются неплотности практически во всех элементах вакуумных систем турбоустановок, в том числе в паровой части вакуумных систем, например, трещины в компенсаторах паропроводов между цилиндрами среднего и низкого давления турбин Т-100-130. Отметим, однако, что паровая опрессовка вакуумных систем турбоустановок представляет собой достаточно сложную задачу, при решении которой необходимо обеспечить максимальную безопасность работы турбоустановки. Решения [13,14] содержат значительное количество специфических условий, определяемых обычно как «ноу-хау», поэтому на первом этапе реализации этих решений целесообразно обратиться за консультацией к авторам этих решений.

Выводы

1. Проанализированы основные способы обнаружения мест присосов воздуха в вакуумную систему турбоустановки. Показано, что основными недостатками

известных способов являются их большая трудоемкость и невозможность оперативного определения мест присосов воздуха.

2. Разработаны технологии мониторинга герметичности вакуумной системы турбоустановки, позволяющие осуществлять непрерывный контроль и обнаружение мест присосов воздуха по показаниям кислородомеров в различных точках конденсатно-питательного тракта. Технологии успешно используются на ряде электростанций страны.

3. Предложены и внедрены технологии точного определения неплотностей вакуумных систем турбоустановок и вакуумных деаэрационных установок.

Summary

This article considers the urgency of the problem of ensuring impermeability of vacuum system of the turbine and vacuum deaerators. Developed and successfully tested in an industrial operation highly effective instrument and without instruments methods detection place air suction in equipment operating under vacuum, including technology continuous monitoring of impermeability vacuum systems of the turbine and auxiliary turbine equipment.

Keywords: vacuum system of the turbine, vacuum deaerators, air suction, methods for detecting leaks.

Литература

1. Трухний А.Д., Ломакин Б.В. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки: Учебное пособие для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 540 с.
2. Справочник по теплообменным аппаратам паротурбинных установок / Ю.М. Бродов, К.Э. Аронсон, А.Ю. Рябчиков, М.А. Ниренштейн; под общ. ред. Ю.М. Бродова. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 480 с.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (утв. приказом Минэнерго РФ от 19 июня 2003 г. № 229).
4. Методические указания по эксплуатации конденсационных установок паровых турбин электростанций: РД 34.30.501 (МУ 34–70–122–85). М.: СПО Союзтехэнерго, 1986. 214 с.
5. Расчет и проектирование термических деаэраторов: РТМ 108.030.21-78/ В.А. Пермяков, А.С. Гиммельберг, Г.М. Виханский, Ю.М. Шубников. Л.: НПО ЦКТИ. 1979. 130 с.
6. Шарапов В.И. О применении кислородомеров при исследовании и эксплуатации теплоэнергетического оборудования // Энергосбережение и водоподготовка. 2005. № 5. С. 3-7.
7. Патент № 2237814 (Россия). МПК F 01 K 13/00. Способ работы тепловой электрической станции / В.И. Шарапов, Е.В. Макарова// Открытия. Изобретения. 2004. № 28. Заявл. 12.05.2003, № 2003114006.
8. Патент № 2298663 (Россия). МПК F 01 K 17/02. Способ работы тепловой электрической станции/ В.И. Шарапов, Е.В. Макарова, Маликов М.А.// Открытия. Изобретения. 2007. № 13. Заявл. 08.11.2005, № 2005134621.
9. Патент № 2299334 (Россия). МПК F 01 K 13/00. Способ работы тепловой электрической станции/ В.И. Шарапов, Е.В. Макарова, М.А. Маликов// Открытия. Изобретения. 2007. № 14. Заявл. 09.12.2005, № 2005138395.
10. Патент № 2309260 (Россия). МПК F 01 K 13/00. Способ работы тепловой электрической станции/ В.И. Шарапов, Е.В. Макарова, М.А. Маликов// Открытия. Изобретения. 2007. № 30. Заявл. 23.12.2005, № 2005140532.

11. Балабан-Ирменин Ю.В., Фокина Н.Г. Применение ингибиторов для предотвращения внутренней коррозии трубопроводов систем теплоснабжения при высоком содержании кислорода в сетевой воде // Новости теплоснабжения. 2007. № 9.

12. Патент № 2143401 (Россия). МПК С 02 F 1/20. Способ эксплуатации вакуумной деаэрационной установки/ В.И. Шарапов// Открытия. Изобретения. 1999. № 36. Заявл. 17.02.1998, № 98102559.

13. Патент № 2324824 (Россия). МПК F 01 K 17/02. Способ контроля герметичности вакуумных систем турбоустановок/ В.И. Шарапов, М.А. Маликов// Открытия. Изобретения. 2008. № 14. Заявл. 14.09.2006, № 2006133056.

14. Патент № 2324825 (Россия). МПК F 01 K 17/02. Тепловая электрическая станция/ В.И. Шарапов, М.А. Маликов// Открытия. Изобретения. 2008. № 14. Заявл. 14.09.2006, № 2006133059.

Поступила в редакцию

03 февраля 2015 г.

Шарапов Владимир Иванович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ), член редколлегии журнала «Известия вузов. Проблемы энергетики». Тел: 8(842)2432053, 8(960)3733345. E-mail: vlad-sharapov2008@yandex.ru.

Замалеев Мансур Масхутович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», директор Инжинирингового центра Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ). Тел: 8(842)2778-248, 8(903)3361103. E-mail: mansur_zamaleev@mail.ru.

Кудрявцева Екатерина Валерьевна – инженер кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ). Тел: 8(842)2353271, 8(906)1451118. E-mail: kudr-e@mail.ru.