

Кондратенко Александр Николаевич, к.т.н.,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна

АВАРИИ И НЕИСПРАВНОСТИ ПАРОВЫХ КОТЛОВ И ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ИХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Аннотация. В работе рассмотрены аварии и неисправности паровых котлов и теплообменных аппаратов и мероприятия по их предупреждению в теплоэнергетике.

Мероприятия по предупреждению поломок и неисправностей паровых котлов и теплообменных аппаратов проводятся в процессе производства и эксплуатации позволяет повысить надежность паровых котлов и теплообменных аппаратов в теплоэнергетике.

Ключевые слова: Паровые котлы, теплообменные аппараты, прочность, надежность.

Отказы и повреждения паровых котлов могут возникать по различным причинам. Особое влияние на элементы паровых котлов оказывает воздействие переменных во времени высоких давлений и температур, которые особенно сильно проявляются при разводке котла, переменных режимах и остановке. Кроме того, элементы котла подвергаются значительному влиянию различных коррозионно-эрозионных процессов, возникающих как результат воздействия котловой воды, так и продуктов сгорания топлива.

Все возможные виды воздействия могут быть значительно усилены в результате нарушений обслуживающим персоналом установленных правил и норм эксплуатации паровых котлов и теплообменных аппаратов.

Поэтому изучение характерных поломок и неисправностей паровых котлов и теплообменных аппаратов, вскрытие причин и исключение последних в процессе эксплуатации является основным рычагом в их сокращении.

Основными видами неисправностей и повреждений элементов паровых котлов и теплообменных аппаратов являются: трещины, деформации, забоины, риски, коррозия и эрозия внутренних и наружных поверхностей, уменьшение толщины стенок, разрывы труб, нарушение вальцовочных соединений, образование окалины.

Причины повреждений и неисправностей могут быть эксплуатационными и производственными. К эксплуатационным причинам можно отнести вибрационные процессы, нарушение режимов работы, внутрикотловых процессов, процессов горения, а также хранения паровых котлов и теплообменных аппаратов. К производственным причинам (включая и ремонт котлов) – нарушение технологических процессов, как при изготовлении, так и при сборке и ремонте.

Нарушение температурного режима работы паровых котлов и теплообменных аппаратов может привести к образованию трещин, деформаций, разрыву трубок и к пожару котла.

Трещины, появляющиеся в сварных швах коллекторов, выгородках и змеевиках экономайзеров, вызваны возникновением значительных температурных напряжений при эксплуатации паровых котлов в сочетании с различными технологическими дефектами, а также причинами старения материала. В основном трещины располагаются в районах сварных швов и опускных труб. Трещины проходят как в продольном, так и в поперечном направлениях. Наиболее часто мелкие трещины в коллекторах главных котлов встречаются в местах наибольшей концентрации напряжений – в районах отверстий, наварышей и креплении арматуры (в местах ввода питательной воды, у патрубков продувания, около опускных труб).



Трещины имеют радиальный характер и значительную глубину, которая в некоторых случаях достигает 15-18 мм. Причиной возникновения таких трещин являются значительные статические и температурные напряжения, являющиеся результатом выбранной конструкции, технологии изготовления, а также резкого изменения температуры материала и влияния на него эрозионно-коррозионного потока рабочего тела. Характер расположения подобных трещин, их ориентация подтверждают то, что причиной повреждения такого рода является высокий уровень местных напряжений в условиях действий циклических теплосмен. При этом протекающие коррозионные процессы, разрушая поверхностные слои материала коллектора, еще больше усиливают местные напряжения. Эти напряжения могут в значительной степени увеличиваться при уносе влаги из парового коллектора в пароперегреватель или упуске воды из парового коллектора, что приводит к значительному увеличению температурной составляющей напряжений.

Эта составляющая может значительно возрасти и в районе, где заглушено большое количество труб, так как в этих районах коллекторов значительно повышается температура металла. Особенно это относится к пароперегревателям, так как в них может произойти значительно большее по величине повышение температуры металла из-за слабого отвода тепла от внутренней стенки коллектора к перегретому пару. В таких случаях может образоваться выпучивание трубной доски пароперегревателя.

Трещины в местах загиба бортов и горловин днища образуются вследствие конструктивных недостатков: малый радиус загиба, несоблюдение технологии изготовления и др. Такие трещины, особенно в начальный период, трудно обнаружить. Признаками появления их могут быть складки или морщинки, образовавшиеся в результате отслоения окарины. Причинами образования кольцевых трещин на вальцовочном поясе служат местные механические напряжения и химические воздействия котловой воды, которая, проникая в зазоры, создает местную концентрацию щелочи. Высокие местные напряжения возникают у развальцованных труб из-за отсутствия компенсации температурных изменений в случаях, если трубки не имеют подвижности у коллекторов. Кроме того, появление кольцевых трещин возможно при неудовлетворительной гидродинамике в циркуляционных контурах. Установлено, что появлению таких трещин способствует неодинаковое тепловое расширение труб при подаче в них воды.

Кольцевые трещины в районе вальцовки труб представляют особую опасность, так как появляются на наружной поверхности трубки в месте ее прилегания к стенке гнезда, и их невозможно обнаружить до тех пор, пока они не станут сквозными. Если трубки с такими дефектами не будут обнаружены, то возможен их отрыв и авария котла.

Обнаружение таких трещин возможно при внутренних очистках котла, когда на очищенной поверхности появляются тонкие валики в виде нитки, которые отлагаются над трещиной. При очистке трубки начальные мелкие трещинки можно обнаружить через лупу. При сквозных кольцевых трещинах вследствие пропуска через них воды у мест вальцовки с наружной стороны трубки образуется отложение солей. Характер кольцевых трещин чаще интеркристаллический.

Трещины и свищи в водогрейных, экранных, пароперегревательных трубках возможны при:

- перегреве стенок трубки;
- износе, утонении и коррозии;
- поставке труб, не соответствующих нормам и имеющих производственные дефекты;
- некачественной установке.

Повреждения от перегрева водогрейных трубок происходят из-за прекращения или снижения циркуляции при закупорке трубок шламом или упуске воды. Некачественная вода,



несоблюдение режимов продувки и сроков проведения чистки котла приводят к образованию отложений, накипи и шлама на стенках трубок. Все это способствует резкому снижению коэффициента теплопередачи, усилению перегрева и, как следствие, появлению раздутия, отдельных выпучин и свищей, а зачастую приводят к разрыву трубки.

Деформация и прогиб происходят при значительном перегреве трубок по всей поверхности.

Деформации в большей степени подвергаются трубки, имеющие наибольшую тепловую нагрузку.

Разрыв экранных и конвективных трубок от перегрева стенки из-за наличия накипи и нарушения циркуляции характеризуется тем, что края разрыва утонены и металл вытянут. Разрыв труб в результате упуска воды обычно происходит при быстром перегреве металла и характеризуется отсутствием деформации его и более острыми кромками в месте разрыва. Наряду с разрывом трубок экранных и конвективных пучков в паровых котлах имеют место разрывы и в опускных трубках. Эти разрывы носят характер поперечных трещин, которые располагаются, как правило, на расстоянии 10-15 мм от водяного коллектора и обращены в сторону экранной стенки. Причиной образования этих трещин является совместное действие наружной и внутренней коррозии в районе корней трубок, где часто скапливается влага.

Вырывание трубки из гнезда может произойти в результате деформации от перегрева или действия реакции струи пара, выходящего в месте разрыва. Часто разрыв и вырывание из гнезда одной трубы вызывает вырывание из гнезд соседних труб. На ускорение разрыва труб может оказать значительное влияние истирание поверхности трубок. При уменьшении толщины стенки до предельных толщин по прочности происходит разрыв.

Повреждение трубок перегревателя может произойти либо из-за перегрева трубок, либо из-за некачественного материала трубок. Перегрев трубок вызывает постоянное выгорание углерода и образование окислов металла, проникающих по границам зерен в толщу стенки трубки, в результате чего на поверхности трубки возникают мелкие продольные трещины. Этот процесс разрушения металла кончается, как правило, разрывом трубки по наиболее глубокой трещине. Перегрев металла трубки до пластического состояния может вызвать и другой вид повреждения – раздутие трубки и ее разрыв в месте наибольшего утонения. Поэтому при осмотре труб пароперегревателя необходимо обращать внимание на состояние их внешней поверхности и отсутствие следов перегрева стенок, а также на диаметр трубок на предмет возможного их раздутия.

Характерными повреждениями трубок, змеевиков (экономайзеров) являются:

- появление свищей в местах сварных соединений;
- деформация, провисание змеевиков.

Основной причиной появления свищей является нарушение технологии сварки. Провисание змеевиков связано с нарушением теплового и гидравлического режима работы экономайзеров в процессе эксплуатации, поскольку у них имеет место значительная неравномерность тепловосприятия параллельно включенных змеевиков. При работе паровых котлов на нагрузках 60-80 % запас устойчивости потока в наиболее обогреваемом змеевике экономайзера имеет значения ниже рекомендованных. При таких малых запасах устойчивости потока в наиболее обогреваемых змеевиках динамические возмущения потока могут привести к закипанию воды в этих змеевиках, полному испарению воды, а иногда и к пульсации потока. Все это приводит к нарушению нормального температурного режима металла труб, появлению дополнительных напряжений, а, следовательно, к провисанию змеевиков. Нарушение температурного и гидравлического режимов может быть усилено при увеличении избытка воздуха, а также загрязнении и выходе из строя части труб испарительной и пароперегревательной поверхностей нагрева котла.



Особо опасно температурное нарушение режима работы котла при выпуске воды или общем нарушении циркуляции, в результате чего трубная поверхность котла начинает резко нагреваться, прочность материала снижается, что приводит к деформации трубной системы, образованию трещин, разрывов трубок и вырыванию трубок из вальцовочных соединений с коллектором. Разрывы трубок особенно вероятны, когда после выпуска воды происходит питание котла водой с температурой значительно ниже, чем температура стенок, что вызывает значительные температурные напряжения и разрушение трубок и всего котла.

Коррозия является фактором, оказывающим значительное влияние на разрушение элементов паровых котлов и тепловых аппаратов. В основном коррозия зависит от состава рабочего тела, условий работы металла, качества материала, состояния наружной поверхности, наличия местных напряжений.

Различают внутреннюю коррозию, протекающую внутри трубок и коллекторов котла, и наружную, протекающую снаружи по газовому тракту. Для водотрубных котлов внутренняя коррозия протекает под воздействием химического состава воды, наружная – под воздействием различных газов.

Диаметр отдельных поражений точечной коррозии достигает 0,2–1,0 мм. Красный цвет окислов указывает на кислородную коррозию, которая характеризуется бугорками окислов с плотной наружной коркой и рыхлыми темными продуктами коррозии внутри язвин под коркой. Черная магнитная закись – окись железа в виде рыхлых отложений или порошка характерна для процесса щелочной коррозии или наносных отложений продуктов коррозии металла трубопроводов. Плотная окалина реже в виде чешуек магнетита образуется в результате пароводяной коррозии.

Внутренние поверхности нагрева котлов, как правило, имеют плотные равномерные отложения светло-бурого цвета толщиной 0,05–0,2 мм. В котлах, выработавших около 10000 часов на внутренних поверхностях трубок встречаются коррозионные поражения и отдельные язвины глубиной 0,2 мм. Коррозионное поражение трубок в основном представлено в виде точек и пятен, неравномерно распределенных по всей поверхности.

Наиболее характерным поражением трубок конвективного и экранного рядов является поражение материала под слоем отложений – подшламовая (ракушечная) коррозия. Причиной появления такой коррозии является взаимодействие металла трубок с агрессивными примесями, образующимися при гидролизе солей жесткости, и с содержащимися в воде окислами железа и меди с одновременным концентрированием этих примесей в слое пористых отложений.

Коррозионные процессы протекают тем интенсивнее, чем больше толщина отложений и выше тепловой поток. Особенностью такой коррозии является то, что по мере возрастания язвины скорость процесса значительно ускоряется. Подшламовая (ракушечная) коррозия трубок конвективных и экранных пучков представляет большую опасность, особенно для высоконапорных котлов, так как приводит к резкому ослаблению трубок (утонению стенок) и, следовательно, к увеличению напряжений в пораженных районах и в конечном итоге к разрыву трубок.

Наружная коррозия проявляется по всему газовому тракту, включая поверхности нагрева, газоходы и дымовую трубу. Повреждение металла может происходить в результате воздействия активно реагирующих веществ, содержащихся в газообразных и твердых продуктах сгорания, в результате чего может происходить газовая, высокотемпературная и низкотемпературная коррозия. Газовая коррозия проявляется на наружных незащищенных перегретых поверхностях при соприкосновении с газовой средой.

Высокотемпературная (ванадиевая) коррозия в основном поражает поверхность нагрева экранного, конвективного и пароперегревательного пучков. Образующиеся при этом



ванадаты налипают на поверхности металла, имеющего высокую температуру, и, будучи активными окислителями, вызывают интенсивную химическую коррозию.

Низкотемпературная коррозия поражает металл поверхностей нагрева котла, имеющих сравнительно низкую температуру, в случае конденсации на этих поверхностях влаги, содержащей серную кислоту. В основном низкотемпературная коррозия проявляется на наружных поверхностях экономайзеров и на газоходах котла.

Футеровка котла имеет различные виды повреждений, к которым можно отнести: выпадение кирпичей, трещины, деформации фурм, обгорание и коррозию крепежа. Все эти повреждения могут быть вызваны вибрацией котла, а также резкими перепадами температур, вызванными либо попаданием в топку воды, либо подачей большого количества холодного воздуха после прекращения горения топлива.

Загрязнение наружных поверхностей котла часто приводит к серьезным последствиям (появлению трещин, свищей и др.). При несоблюдении правил эксплуатации наружные поверхности нагрева бывают покрыты сажистыми отложениями, достигающими толщины 1-1,5 мм, что приводит к резкому сокращению величины зазора между ними. На наружной поверхности труб в районах водяного коллектора нередким явлением бывают плотные трудноудаляемые отложения. Корни труб часто покрыты продуктами коррозии. Такие отложения нарушают теплообменные процессы между потоком газа и нагревательной поверхностью котла, создают неравномерные потоки тепла и, как следствие, дополнительные температурные напряжения, которые усиливают или порождают процесс развития тепловых трещин.

При некачественной работе форсунок распыл топлива значительно ухудшается, что снижает качество сжигания топлива, в результате чего на трубной системе появляются наросты (медведь), которые резко сокращают теплообмен, что может в конечном итоге привести к повреждению трубок.

Внутриколлекторные устройства имеют, как правило, следующие виды повреждений: трещины в районе сварных швов выгородки в паровом коллекторе, деформации отдельных деталей, коррозию элементов. Главной причиной появления трещин является нарушение технологии сварки на предприятии или при ремонте. Причиной, способствующей появлению и развитию трещин, являются температурные напряжения на этих участках, возникающие при разводках и резких изменениях нагрузок главных котлов.

Арматура главных котлов в основном подвержена коррозионному износу. Также часто встречаются риски, забоины, вмятины, трещины уплотнительных поверхностей.

Конденсаторы и теплообменные аппараты (водоподогреватели, нефтеподогреватели) имеют неисправности и повреждения, вызванные резким изменением температуры рабочего тела, вибрацией или коррозионно-эрозионными процессами. Перечисленные явления вызывают трещины трубок, язвенную коррозию металла, нарушение вальцовочных соединений. В некоторых случаях наблюдается сквозная коррозия корпусов теплообменных аппаратов, а приемные и отливные патрубки циркуляционных насосов имеют утонение на 40-50% их первоначальной толщины. Причиной появления трещин в трубках теплообменных аппаратов, по-видимому, являются активные коррозионные процессы, способствующие утонению трубок, и вибрационные процессы, которые создают динамические усилия, способствующие резкому увеличению динамических напряжений и появлению трещин, ослаблению вальцовочных соединений, перетиранию трубок в районах диафрагм.

Мероприятия по предупреждению поломок и неисправностей паровых котлов и теплообменных аппаратов проводятся в процессе производства и эксплуатации.

В процессе проектирования и изготовления паровых котлов основные мероприятия по повышению надежности могут быть следующие:



- выбор оптимальных конструкций паровых котлов и теплообменных аппаратов в соответствии с условиями их использования;
- выбор рациональных технологий изготовления, обработки, сборки, а также чистки при ремонтах паровых котлов и теплообменных аппаратов;
- создание материалов с повышенной усталостной прочностью и коррозионной стойкостью;
- обеспечение необходимого контроля за качеством изготовления, сборки и испытания;
- анализ, обобщение опыта эксплуатации и использование результатов при проектировании, постройке и ремонте.

В процессе эксплуатации паровых котлов и теплообменных аппаратов надежная работа может быть обеспечена как в процессе использования, так и в процессе проведения планово-предупредительных осмотров и ремонтов. В процессе использования главным фактором обеспечения надежности паровых котлов является соблюдение температурного режима их работы, особенно при переменных режимах, а также при вводе и выводе котлов из действия.

Поддержание заданного температурного режима обеспечивается строгим соблюдением инструкций по эксплуатации паровых котлов, которыми предусматривается определенное время ввода и вывода котла из действия, а также перехода с режима на режим.

Обеспечение заданного температурного уровня парового котла также достигается:

- отсутствием отложений накипи, шлама и других веществ на внутренних поверхностях нагрева, а также твердых продуктов сгорания (зола, сажа) особенно в районах корней труб;
- исключением неравномерности обогрева труб;
- отсутствием коррозионных поражений внутренних и наружных поверхностей паровых котлов;
- исключением упуска воды, резкого переохлаждения отдельных участков поверхности нагрева в результате питания котла или после упуска воды, а также обдувки горячего котла холодным воздухом;
- соблюдением режима продувания котла;
- исключением нарушения циркуляции в котле.

Важным фактором надежной работы паровых котлов является соблюдение водного режима, который обеспечивается докотловой и внутрикотловой обработкой воды. Питательная и котловая вода должны удовлетворять рабочим и предельным нормам качества воды, определенным правилами эксплуатации, что обеспечивает минимальный уровень коррозии.

Одним из факторов, оказывающим значительное влияние на надежную работу котла, являются правильно организованные топочные процессы, где работа форсуночных и воздухонаправляющих устройств является определяющей. Поэтому содержание последних, а также футеровки котла в исправном и работоспособном состоянии обеспечивают снижение неисправностей и повреждений, возникающих в процессе эксплуатации.

Особым режимом для паровых котлов является режим их хранения, при нарушении которого могут усиливаться коррозионные процессы. С целью предохранения котла от коррозии в период его бездействия необходимо строго соблюдать режим выбранного хранения, а также не допускать:

- неплотности в арматуре котла и соединениях трубопроводов;
- скопления сажи в котле, особенно у корней трубок;
- проникновения влаги к наружным поверхностям трубок;
- резких изменений температуры воздуха и повышения влажности.



Список литературы:

1. Багров И. В. Надежность технических систем. - СПб.: СПГУТД, 1999. - 99 с. . – Текст: непосредственный.
2. Труханов В.М., Надежность в технике - М.: Машиностроение, 1999. - 597 с. – Текст: непосредственный.
3. ГОСТ 27.002-15. Надежность. Термины и определения. М., Стандартиформ, 2016. – Текст: непосредственный.

