

ТРУБЧАТЫЕ ПЕЧИ. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Технологическое оборудование нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств эксплуатируется в условиях комплексного воздействия повышенных температур, давлений и агрессивных технологических сред, которые в разных количествах могут содержать водород, сероводород, меркаптаны, соединения хлора и другие коррозионно-активные компоненты.

Аварийная остановка печи всегда является чрезвычайным событием и вызывает ряд проблем и последствий, таких как снижение производительности, а также необходимость остановки, повторного пуска и выхода на режим всей установки, а главное — при аварийной остановке печи возможна разгерметизация с разливом, образование газообразного облака, пожар.

Трубчатая печь является аппаратом, предназначенным для передачи нагреваемому продукту тепла, выделяющегося при сжигании топлива в топочной камере печи.

Наибольшее практическое применение на НПЗ получили радиантно-конвекционные печи. Они имеют две отделенные друг от друга секции.

В радиантной секции тепло передается за счет радиационной теплопередачи путем поглощения лучистого тепла. В конвекционной секции тепло передается за счет конвективной передачи тепла путем омывания поверхности труб дымовыми газами. Внутри печи расположен многократный изогнутый стальной трубопровод — змеевик, по которому непрерывно прокачивается нагреваемая смесь. Смесь подается в конвекционную секцию, после чего проходит радиантную секцию. Жидкое и газообразное топливо сжигают в горелках радиантной камеры. В результате повышается температура дымовых газов и светящегося факела, представляющего собой раскаленные частицы горячего топлива. Тепловые лучи падают на наружные поверхности труб и внутренние поверхности стен радиантной камеры печи. Нагретые поверхности стен, в свою очередь, излучают тепло, которое также поглощается поверхностями радиантных труб. Большая часть используемого тепла передается в радиантные секции, остальное — в конвекционные секции. Дымовые газы проходят конвекционную секцию, омывают находящиеся там трубы, отдавая тепло. Эффективность передачи тепла конвекцией обусловлена скоростью движения дымовых газов. Пройдя конвекционную камеру, дымовые газы уходят в дымовую трубу.

Трубчатые печи условно разделяются на реакторные, подогревательные и рибойлерные. В реакторных печах (установках термического крекинга, пиролиза) осуществляются процессы превращения углеводородов под влиянием высоких температур.

В подогревательных печах сырье нагревается до определенной температуры перед подачей в реактор (установки каталитического крекинга и риформинга, изомеризации, дегидрирования и др.), ректификационную колонну (установку первичной перегонки) или другой аппарат.

Рибойлерные печи выполняют функции кипяильника (рибойлера) ректификационных колонн: в эти печи сырье поступает с низа колонн и после нагрева возвращается в виде паров или парожидкостной смеси обратно в колонны. Обвязка трубчатой печи зависит от ее конструкции.

Анализ аварийных ситуаций на взрывопожароопасных производствах показал, что **трубчатая печь является одним из наиболее опасных технических устройств**, обладающих повышенными параметрами риска по сравнению с другими видами оборудования. Наиболее уязвимыми элементами с точки зрения быстрого развития процессов старения металла являются **змеевики трубчатых печей**.

В настоящее время в нефтепереработке используют печи разных конструкций, в которых осуществляется нагрев сырья до температуры 300 – 950 °С. В условиях высоких температур, давлений и объемных скоростей сырьевых потоков, а также воздействия разогретых дымовых газов могут развиваться различные коррозионные и эрозионные процессы, приводящие в совокупности к потере прочности змеевиков, изменению формы и к их разгерметизации и разрушению.

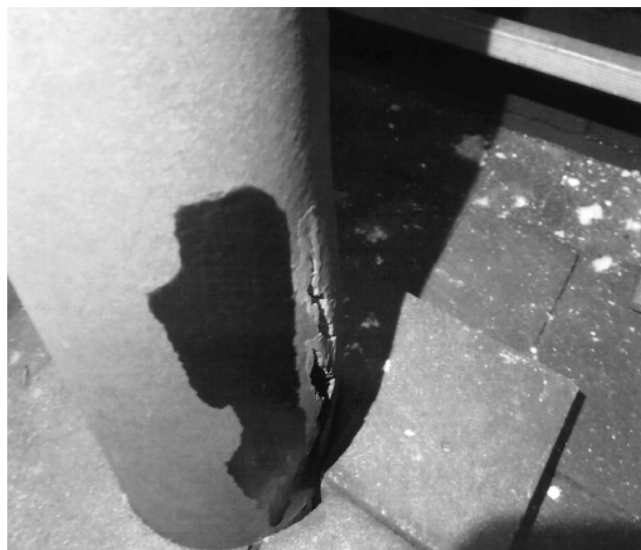
Основной причиной ограничения срока службы печных змеевиков нагревательных печей является **тепловое старение под действием температурных и временных факторов**, что обуславливает изменение их микроструктуры и снижение длительной прочности металла. В наибольшей степени это касается змеевиков реакционных печей пиролиза и парового риформинга, которые работают при температурах, на несколько сотен градусов превышающих температуру эксплуатации других змеевиков нагревательных печей. Для них преобладающим фактором деградации являются высокотемпературная ползучесть и хрупкое разрушение в результате науглероживания металла.

Примером может послужить инцидент, произошедший 13 октября 2023 г. на объекте ОАО «Нафтан».

На установке получения водорода комплекса «Гидрокрекинг» (опасный производственный объект III типа опасности) был зафиксирован рост температуры печи 220-Н01 позиций TIRA-20015 (перевал ряда А), TIRA-20016 (перевал ряда В), и при визуальном осмотре радиантной камеры печи был обнаружен пропуск одной из реакционных труб по ряду А. Анализ трендов (графиков) выдерживания технологических норм, соблюдения регламентированных значений параметров, в том числе параметров, определяющих взрывоопасность технологического процесса и их критических значений, показал, что отклонений от регламентированных значений параметров, а также срабатывания сигнализации и блокировок зафиксировано не было.

Была проведена ревизия реакционных труб технологической печи в целях дальнейшего ее ремонта. По результатам ревизии установлено, что трубы № 70, 71, 72 имеют более высокую твердость, что свидетельствует о негативном термическом воздействии пламени на них, принято решение об их замене (химический состав соответствует стали марки CENTRAALLOY G4852 Micro).

Также следует отметить, что ранее, 24 апреля 2018 г., на данной установке произошел аналогичный случай, связанный с пропуском реакционной трубы технологической печи 220-Н01. Согласно заключению Института порошковой металлургии от 31 июля 2018 г. № 10540 причиной разрушения реакционной трубы радиантной камеры печи 220-Н01 является изменение структуры и свойств материала в процессе эксплуатации в районе разрыва под воздействием высоких температур.



С целью исключения в дальнейшем инцидентов, связанных с аварийной остановкой печи, а также с учетом теплового старения под действием температурных и временных факторов, в рамках остановочного ремонта в октябре 2024 г. была произведена замена труб змеевиков печи из труб стали марки Manaurite XM с температурой применения до 1100 °С.

Другой причиной снижения долговечности змеевиков нагревательных и реакционных печей **является воздействие технологической среды на металл труб.** На внутренних поверхностях труб осаждаются продукты конденсации и частичного коксования углеводородов, а также соли недостаточно обессоленной нефти. Отложения снижают теплопередачу, увеличивают локальную температуру стенки и тем самым ускоряют процессы коксования продукта и деградации материала змеевиков.

Отслоение продуктов коррозии приводит к утонению стенки трубы и локальному перегреву в местах утонения.

Для печных змеевиков установок каталитического риформинга и гидроочистки наибольшую опасность представляет водородная коррозия, которая приводит к распаду карбидов и обезуглероживанию сталей. Обезуглероживание существенно снижает механические и особенно пластические свойства материалов.

Примером может послужить инцидент, произошедший 21 ноября 2023 г. на объекте ОАО «Нафтан».

На установке гидроочистки топлива № 4 (типа А-24/9 × 2 РТ) (опасный производственный объект II типа опасности) был обнаружен пропуск трубчатого змеевика печи поз. П-2.

По результатам ревизии змеевиков выявлено: наличие трещин с раскрытием на трубе № 246; образование окалины до 2 мм и наличие цвета побежалости на трубах потока № 7, камеры радиации; установлена фактическая толщина стенок труб (6,0–8,2 мм при отбраковочной величине 3,5 мм), толщина отводов (7,8–10,8 мм при отбраковочной величине 4,0 мм); установлена твердость основного металла в пределах 13–171 ед. НВ (для стали 20 материал, из которого изготовлены трубы змеевика, твердость не нормируется).

Комиссия приняла решение о проведении ремонтных работ в части демонтажа труб змеевика потока № 7 печи поз. П-2, замене

дефектного участка трубы № 328 в камере № 2, ремонте дефектных участков методом наплавки на трубах в камере № 1, выполнении монтажа дополнительных накладных пластин в местах трения элементов змеевиков, выполнении ремонта сварных соединений. Анализ трендов (графиков) выдерживания технологических норм, соблюдения регламентированных значений параметров, в том числе параметров, определяющих взрывоопасность технологического процесса и их критических значений, показал, что отклонений от регламентированных значений параметров, а также срабатывания сигнализации и блокировок зафиксировано не было.

При демонтаже труб змеевика потока № 7 камеры радиации были обнаружены отложения, полностью заполняющие проходное сечение потока, первый по ходу движения потока № 7 трубопровод № 235 на выходе из конвекционной части не имел проходимости (фото).

После демонтажа змеевик был разрезан на куски, все отложения выбиты, изучены и направлены на анализ в исследовательскую лабораторию. По результатам исследований все отложения имеют однородный характер, не содержат каких-либо инородных предметов и преимущественно состоят из органических веществ со значительной (до 45 % масс.) долей смолисто-асфальтовых веществ. Также в исследуемых образцах обнаружена окалина и механические примеси. Точное время образования отложений определить не представляется возможным.



Таким образом, причиной инцидента явилось частичное закупоривание вертикального трубчатого змеевика печи поз. П-2 в нижних точках (калачах) шламом, что привело к уменьшению расхода потока через змеевик

и локальному перегреву потока. Повышение температуры дизельного топлива в локальных точках привело к протеканию реакции конденсации, при которой образуются высокомолекулярные соединения – смолы и асфальтены, которые в итоге отлагаются на стенках трубчатого змеевика, уменьшая расход потока через змеевик. В результате происходит снижение теплосъема со стенок труб змеевика и нагрев до температуры пластической деформации (разгерметизация змеевика).

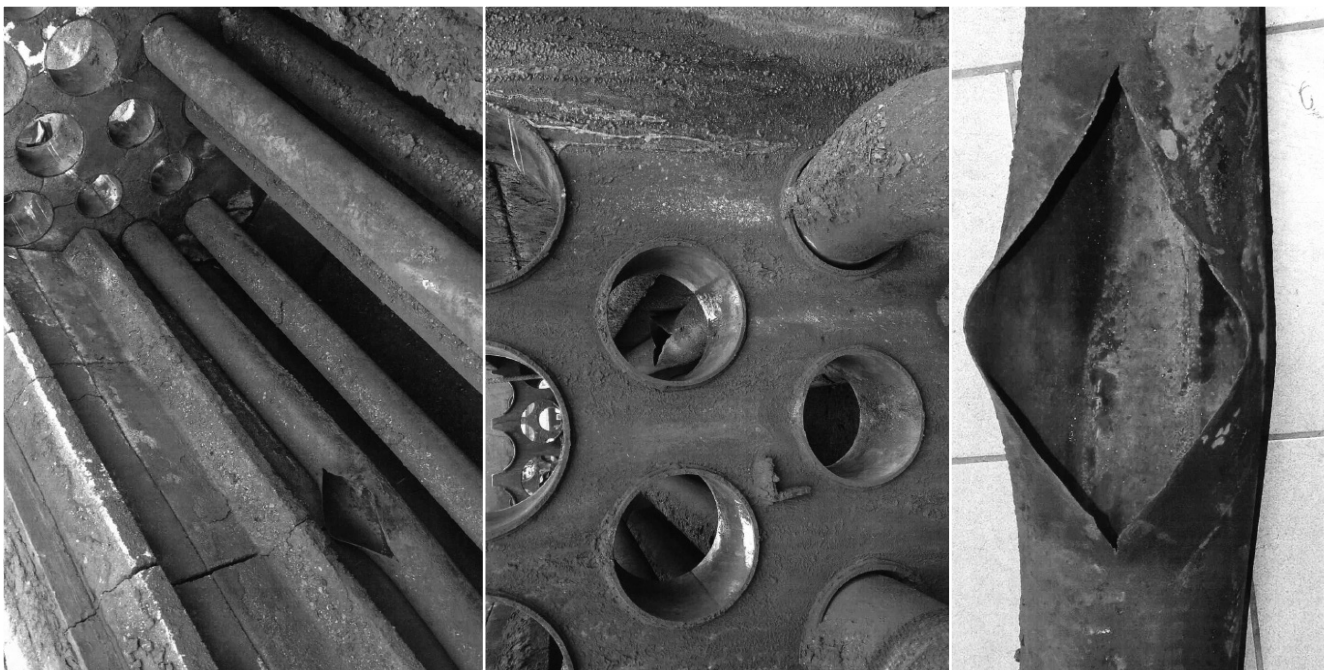
Еще одним примером является инцидент, произошедший 9 марта 2024 г. на объекте ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод».

На секции 100 установки первичной переработки нефти ЛК-6У № 1 ОАО «Мозырский НПЗ» (опасный производственный объект I типа опасности) был обнаружен пропуск трубчатого змеевика конвекционной части печи П-102N (с возгоранием без выхода пламени наружу).

По результатам ревизии змеевика выявлено раскрытие трубы 2-го ряда нижнего пакета конвекционного змеевика печи на

верхней образующей трубы в недоступной для контроля части. Анализ трендов (графиков) выдерживания технологических норм, соблюдения значений параметров, в том числе параметров, определяющих взрывоопасность технологического процесса и их критических значений, показал, что отклонений от регламентированных значений параметров, а также срабатывания сигнализации и блокировок зафиксировано не было.

При проведении технического расследования причин происшествия с учетом проведенного исследования дефектной трубы конвекционного змеевика печи в профильной научно-исследовательской организации ГНУ «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа» комиссией установлено, что причиной происшествия стало утонение трубы второго ряда конвекционного змеевика печи П-102N (химический состав соответствует стали марки 20) вследствие увеличения скорости сульфидно-оксидной хлоридной коррозии на фоне повышенного содержания хлора в нефти, с последующим раскрытием змеевика печи под воздействием избыточного давления (фото).



Для выявления источника хлора комиссией изучены данные по содержанию хлора в поступающей нефти с 2016 г. Установлено, что во второй половине апреля – начале мая 2019 г. на переработку в ОАО «Мозырский НПЗ» поступала нефть с аномально высоким содержанием органических хлоридов до 343 ppm (при норме

10 ppm). За исключением указанного периода, содержание хлора в нефти не превышало 1,5 ppm.

По результатам расследования инцидента с целью исключения подобных случаев запланирована замена конвекционного змеевика печи П-102N, в том числе материального исполнения (с применением труб из марки стали 15X5M).

Следует отметить, что продолжительность пробега (в том числе межремонтного) всех печей зависит от следующих условий:

- производительности;
- качества и постоянства состава сырья;
- строгого соблюдения регламентированных параметров технологического процесса (давления, температуры) в каждой зоне печи.

Ремонт змеевиков трубчатых печей в основном заключается в чистке их внутренних поверхностей от отложившегося кокса, наружных поверхностей труб от налета золы, а также в смене износившихся элементов (труб и ретурбендов). В основном в практике эксплуатации печей нефтеперерабатывающих заводов встречаются следующие дефекты трубчатых змеевиков: износ труб (особенно в концах) по внутренней поверхности, хрупкое разрушение труб.

От состояния и долговечности трубчатых змеевиков зависит продолжительность непрерывной работы печи, а в большинстве случаев – технологической установки в целом. Поэтому выявлению причин износа трубчатых змеевиков следует уделять большое внимание, в том числе при проведении технического диагностирования. К сожалению, в настоящее время для диагностики прогара змеевика применяются методы, которые не позволяют проводить мониторинг толщины его стенки на работающей печи.

В основном в качестве диагностических показателей выступают:

- физические (технологические) параметры;
- показатели, получаемые из измеренных параметров, характеристик оборудования в статике и динамике, расчетных

характеристик и показателей (материальные и энергетические балансы, показатели эффективности, КПД).

В части **противоаварийной защиты нагреваемых элементов (змеевиков) нагревательных печей** в составе технологической и проектной документации разработчиком технологического процесса и проектной организацией должны быть предусмотрены:

- аварийное освобождение змеевиков печи от нагреваемого жидкого продукта при повреждении труб или прекращении его циркуляции;
- блокировки по отключению подачи топлива при прекращении подачи сырья;
- средства дистанционного отключения подачи сырья и топлива при авариях в системах змеевиков;
- средства сигнализации о падении давления (расхода) в системах подачи сырья.

Топливный газ для нагревательных печей должен соответствовать регламентированным требованиям по содержанию в нем жидкой фазы, влаги и механических примесей (регламентированные требования должны быть установлены разработчиком технологического процесса в технологической документации), а также установлены средства, исключающие наличие жидкости и механических примесей в топливном газе, поступающем на горелки.

В заключение хотелось бы отметить, что выполнение требуемых условий эксплуатации трубчатых печей на поднадзорных объектах, наличие и работоспособность средств противоаварийной защиты и локализации взрывов являются залогом безаварийной работы установок и предприятий в целом.

*Александр САЗОНКО,
начальник управления надзора
за безопасностью предприятий химической
промышленности, переработки зерна
и аммиачными установками
Госпромнадзора*