

Ю. А. Бадьин (гл. спец.)^а, О. А. Вершинин (к.т.н., м.н.с.)^б, В. М. Ящук (к.т.н., гл. спец.)^а

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СНИЖЕНИЯ РИСКОВ И УВЕЛИЧЕНИЯ МЕЖРЕМОНТНЫХ ПРОБЕГОВ НА ПРИМЕРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ УСТАНОВКИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА

*Всероссийский научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт
оборудования нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности,*

^а отдел прочностных расчетов Конструкторского бюро,

^б лаборатория коррозионной стойкости материалов

400078, Волгоград, пр. Ленина, 98б; e-mail: yuabadin2025@yandex.ru

Yu. A. Badyin, O. A. Vershinin, V. M. Yashchuk

ENSURING RISK REDUCTION AND INCREASING RUN LENGTH BETWEEN OVERHAUL ON THE EXAMPLE OF TECHNOLOGICAL FURNACES OF AN OIL REFINERY INSTALLATION

*All-Russian Research and Design Institute of Equipment for the Oil Refining and Petrochemical Industry
98b, Prospekt Lenina Str., 400078, Volgograd, Russia; e-mail: yuabadin2025@yandex.ru*

Рассматриваются проблемы, возникающие при увеличении межремонтных пробегов технологических печей нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ). Описывается механизм возникновения эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) для трубных элементов из углеродистых и низколегированных сталей вследствие уноса коррозионных отложений с поверхности металла при движении жидких сред с высокими скоростями. В качестве фактора образования движения жидких сред с высокими скоростями во внутреннем пространстве змеевиков вследствие фазового расслоения парожидкостных сред. Анализируется локализация зон возникновения интенсивного ЭКИ змеевиков технологических печей с огневым обогревом. Предложены мероприятия по предотвращению интенсивного ЭКИ, способствующие увеличению межремонтных пробегов технологических печей.

Ключевые слова: змеевик; межремонтный пробег; печь с огневым обогревом; фазовое расслоение; эрозионно-коррозионный износ

В нефтеперерабатывающей отрасли большое внимание уделяется увеличению межремонтных пробегов оборудования, что сокращает простои технологических установок, снижает эксплуатационные расходы и обеспечивает выпуск дополнительной продукции.

The issues associated with extending the run lengths between overhaul of process furnaces in oil refineries are examined. The paper describes the mechanism of erosion-corrosion degradation (ECD) for tubular elements made of carbon and low-alloy steels due to the removal of corrosion deposits from the metal surface due the movement of liquid media at high speeds. The paper also discusses the formation of high-speed liquid products in the internal space of coils due to the phase separation of vapor-liquid products. The paper analyzes the localization of zones with intensive ECD in the coils of fired heaters. Possible corrective measures to minimize erosion-corrosion degradation and increase the overhaul intervals of fired heaters are discussed.

Key words: coils; erosion-corrosion degradation (ECD); fired heater; phase separation; run lengths between overhaul

Для успешного проведения работ в данном направлении необходимо изучение опыта эксплуатации технологических установок с увеличенными межремонтными пробегами.

Примером может служить эксплуатация технологических печей установки первичной переработки нефти ЭЛОУ-АВТ-6 АО «Сызранский НПЗ», выявившая технические проблемы, связанные с ростом их аварийности.

Дата поступления 21.06.25

Эта установка, имеющая в своем составе 2 технологические печи с огневым обогревом, была введена в строй в 2001 г. Первоначально печи эксплуатировались с межремонтным пробегом в один год. С 2015 г. установка была переведена на 2-х-летний межремонтный пробег, и в настоящее время рассматривается возможность его увеличения до 3-х лет. В 2023 г. произошла разгерметизация змеевика (прогар) одной из технологических печей, для определения причин которого были проведены исследования металла поврежденной части змеевика и условий эксплуатации печи. Поскольку на установке имеются однотипные печи П-1/2 и П-1/3 (табл. 1), то были проанализированы данные эксплуатации обеих печей.

В 2023 г. обнаружен пропуск змеевика в трубах №31 и №28 камеры радиации печи П-1/2. Случаи разгерметизации змеевиков печи П-1/2 возникали в 2005 и 2008 гг., для печи П-1/3 – в 2020 г. Расположение мест разгерметизации печи П-1/2 на схеме змеевиков показано на рис. 1, схемы змеевиков печей с расположением мест разгерметизации показаны на рис. 2–4. Фото места разгерметизации змеевика в 2023 г. показано на рис. 5.

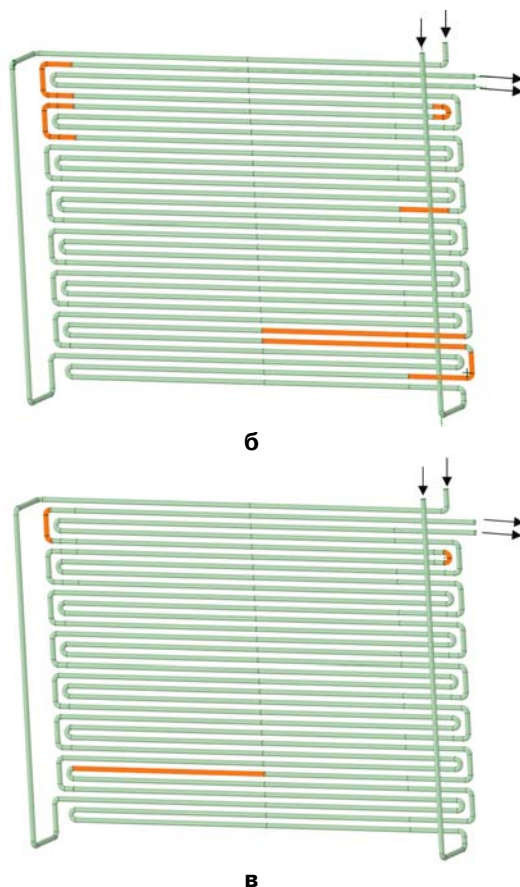
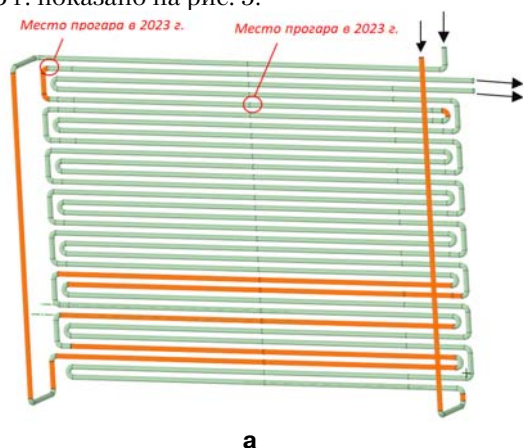


Рис. 1. Схема замены элементов змеевиков печи для потоков №3-4 камеры радиации печи П-1/2: а – за 2021 г.; б – за 2019 г.; в – за 2017 г.; стрелками показано направление потоков; зоны проведения ремонтов совпадают с зоной возникновения разгерметизации (прогара) на концевой трубе змеевика №31; нумерация труб снизу вверх

Таблица 1

Рабочие параметры и эксплуатационные характеристики печей

Индекс	П-1/2 (П-1/3)
Назначение	Создание горячей струи в ректификационной колонне
Пуск в эксплуатацию	2001 г.
Тип	Коробчатая 4-х поточная конвекционно-радиантная
Тип змеевиков	Горизонтальные, соединены отводами
Количество труб в камере:	90 (конвекции) / 62 (радиации)
Материал змеевиков	12CrMo20,5 (отечественный аналог – сталь 15X5M)
Размер труб ($D_n \times S \times L$)*	152 × 8 × 24200 мм
Размер отводов ($D_n \times S \times R$)*	152 × 12 × 137.5 мм
Отбраковочная толщина труб	3.5 мм (камеры конвекции и радиации)
Отбраковочная толщина отводов	4.0 мм (камера конвекции); 4.5 мм (камера радиации)
Рабочая среда в змеевиках	Отбензиненная нефть
Топливо	Углеводородный газ с содержанием $H_2S \leq 0.03\%$ мас.
Температура среды для камеры радиации, вход/выход	240/380 °С
Давление на входе (максимальное разрешенное)	26 кгс/см ²

* D_n и S – наружный диаметр и первоначальная толщина труб и отводов; L – длина труб; R – радиус отвода.

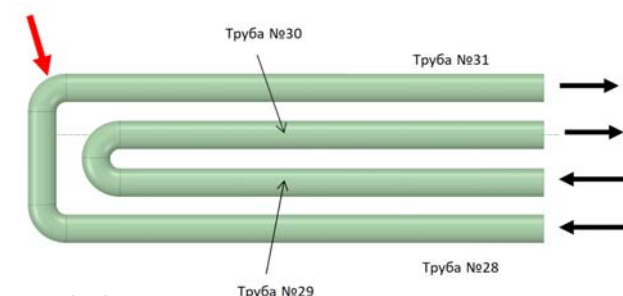


Рис. 2. Схема расположения места разгерметизации в 2005 г. на отводе 90° 152x12 выходной трубы №31 потока №4 змеевика печи П-1/2 (показано красной стрелкой), направление движения среды показано черными стрелками

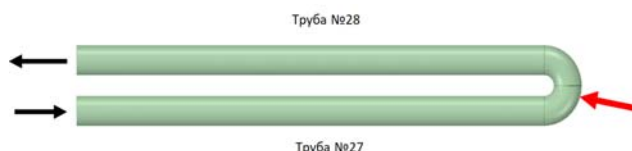


Рис. 3. Схема расположения места разгерметизации в 2008 г. на отводе 90° 152x12 выходной трубы №27 потока №4 змеевика печи П-1/2 (показано красной стрелкой), направление движения среды показано черными стрелками



Рис. 4. Схема расположения места разгерметизации в 2023 г. на выходной трубе №31 и предпоследней трубе №28 152x8 потока №4 змеевика печи П-1/2 (показано красной стрелкой), направление движения среды показано черными стрелками

При анализе рис. 1–4 можно увидеть, что зоны проведения ремонтов с заменой совпадают с зонами возникновения мест разгерметизации, например:

- зона разгерметизации в 2023 г. на концевой трубе змеевика №31, рис. 1 и 4;
- зоны разгерметизации в 2005 г. на отводе концевой трубы №31 и в 2008 г. на отводе труб №27-28, (рис. 2 и 3).

Фактическая скорость износа, рассчитываемая для элементов змеевиков, значительно превышает значение 0.4 мм/год, указанное в нормативно-технической документации для змеевиков печей установок первичной переработки нефти с материальным исполнением из стали 15X5M¹.

Например, для отвода и примыкающего участка трубы №31 ранее выявлялось недопустимое утонение в 2007 г., при этом была проведена замена отвода 90° 152x12 и примыкающего участка трубы №31 длиной 0.5 м после отвода (рис. 5).



а



б



в



г

Рис. 5. Место разгерметизации змеевика: а, б – вид снаружи сквозного отверстия в трубе, примыкающей к внешней стороне отвода; в, г – вид изнутри, стрелками показано наличие зоны локального эрозионного износа, зона начинается на внутренней поверхности в концевой части отвода с переходом на примыкающую часть трубы с возникновением сквозного утонения

Остаточная толщина отвода составила 7.2 мм; срок эксплуатации отвода с 2005 г. Скорость износа стенки C_K может быть определена по формуле:

$$C_K = \frac{S - S_\phi}{T} = \frac{12 - 7.2}{2} = 2.4 \text{ мм/год}, \quad (1)$$

где S – первоначальная (номинальная) толщина стенки, $S = 12$ мм;

S_ϕ – фактическая минимальная замеренная толщина стенки, $S_\phi = 7.2$ мм;

T – продолжительность эксплуатации, лет.

Такая высокая скорость износа создает значительные проблемы и риски в ходе эксплуатации.

Исследование фрагментов поврежденных труб, а также данные предыдущей диагностики показывают, что наиболее вероятной причиной возникновения процессов интенсивного локального эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) является высокая скорость движения нагреваемой среды в змеевиках, обусловленная образованием значительного количества паровой фазы во внутреннем пространстве змеевиков. Возникает ситуация, когда паровая фаза занимает большую часть проходного сечения трубы змеевика, в результате чего увеличивается скорость движения рабочей среды в нем.

Для углеродистых и низколегированных сталей в обеспечении коррозионной стойкости важную роль играет фактор накопления продуктов коррозии на поверхности металла, слой которых защищает ее от быстрого разрушения^{2, 3}. Повышение скорости движения среды приводит к усилению коррозионных процессов, поскольку способствует уносу продуктов коррозии с поверхности металла и оголению его поверхности. Дополнительное воздействие может оказывать повышенное количество механических примесей в технологической (рабочей) среде, что увеличивает эрозию.

Особенно неблагоприятная ситуация складывается для отводов змеевика с движущейся нагретой средой, где доля отгона паровой фазы достигает высоких значений. Происходит инверсия фаз, при которой капли жидкости движутся в паровом потоке.

Сложность течения парожидкостной смеси в данном случае определяется совместным действием двух факторов. При прохождении парожидкостного потока узлов поворота потока (отводов) при действии центробежных сил возникает режим раздельного течения паровой и жидкой фаз. Более тяжелая жидкая фаза отбрасывается на внешнюю сторону отвода, а более легкая паровая (газообразная) фаза собирается на внутренней стороне отвода. Это приводит к возрастанию скорости движения жидкой фазы вследствие уменьшения проходного сечения для жидкой фазы при образовании паровой фазы.

Упрощенная схема прохождения парожидкостной смеси узла поворота потока в виде отвода 180° показана на рис. 6.

Другим фактором, оказывающим значительное влияние, является специфика движения жидкости в криволинейных трубах, которая описывается, например, в⁴. В криволинейных трубах на более быстрые частицы жидкости, движущиеся в середине трубы, действует большая центробежная сила, чем на менее быстрые частицы, движущиеся вблизи стенок. Это приводит к возникновению вторичного течения, которое в середине трубы направлено к внешнему закруглению, т.е. наружу, а около стенок трубы – к внутреннему закруглению, т.е. к центру кривизны, как показано на рис. 7⁴. В результате скорость движения жидкости в зонах на внешней стороне отвода в еще большей степени увеличивается.

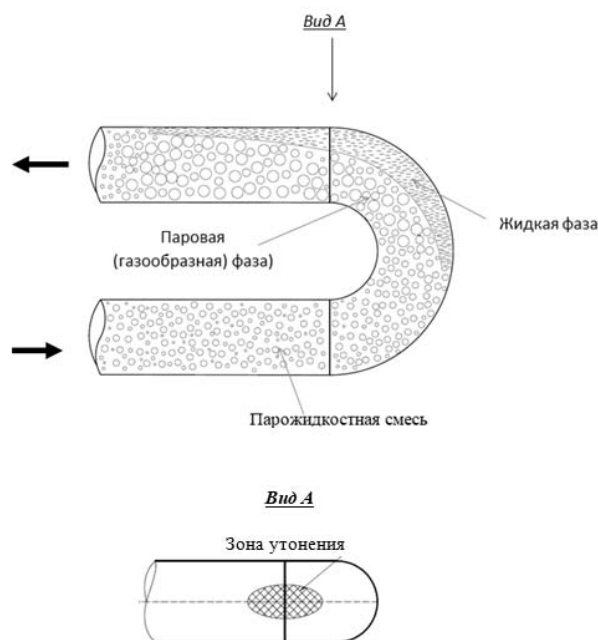


Рис. 6. Схема прохождения парожидкостной смеси узла поворота потока в виде отвода 180°: черными стрелками показано направление движения рабочей среды; вид А – расположение зоны утонения

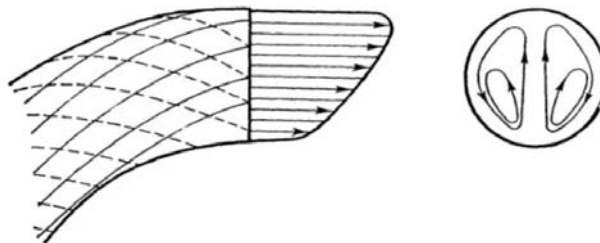


Рис. 7. Возможный вариант течения жидкости в криволинейной трубе⁴

В условиях развитого турбулентного режима перед отводом происходит перестройка структу-

ры течения, в результате которой парожидкостный поток в отводе движется по 2-м спиралеобразным траекториям с изменяющимся в поперечном сечении радиусом кривизны. Существенно увеличиваются центробежные силы, действующие на капли жидкости, имеющие более высокую плотность, чем пар, и они с высокой скоростью отбрасываются на стенку отвода.

Вследствие высокой скорости движения и сокращения времени контакта со стенкой, значительно увеличивается ударное воздействие капель на материал отвода.

В направлении внешней стороны отвода действует большая центробежная сила, чем в направлении внутренней, что обусловлено соответствующим направлением векторов центробежных сил. В результате интенсифицируются эрозионные явления на «внешней стороне отвода с выраженным дефектом (утонения) в центре». Износ сосредотачивается внутри поворота, и при этом может распространяться на примыкающий к отводу участок трубы.

На выходе потока из отвода происходит обратная перестройка структуры течения – 2 спиралеобразных потока объединяются в один дисперсно-кольцевой, периферийная область которого образована жидкостной пленкой, а внутренняя – паровой фазой. Несмотря на высокую среднюю скорость потока, ЭКИ за счет ударного воздействия капель жидкости на прямолинейном участке змеевика существенно снижается, возрастает эрозионное воздействие жидкостной пленки на поверхность стенки трубы за счет тангенциальных сил вязкостного трения.

Схема расположения мест разгерметизации и замен элементов змеевиков (рис. 1–4), а также характер утонения элементов змеевиков (рис. 8, 9), подтверждает описанную картину повреждения – разгерметизация происходит на концевых участках змеевиков, в концевых по ходу движения среды трубах, где образуется максимальное количество паровой (газообразной) фазы.

При ремонте меняют отводы и участки труб, подвергнутые эрозионному воздействию, примыкающие к отводу со стороны выхода рабочей среды. Как правило, заменяются участки небольшой протяженности, обычно 0.5 м.

Отводы змеевиков изготовлены с большей толщиной стенки по сравнению с толщиной стенки труб (12 и 8 мм, соответственно). Потому решение о замене элементов с утонением принимается для каждого случая отдельно.

ЭКИ происходит также на протяженных горизонтальных участках труб змеевиков вследствие фазовой неоднородности^{5–10}.

В горизонтальных и наклонных под малым углом к горизонту каналах различают расслоенный, волновой, пузырьковый, снарядный, эмульсионный, дисперсно-кольцевой режимы течения⁹.

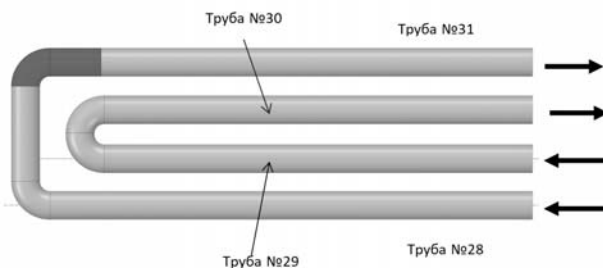


Рис. 8. Схема выполнения замен элементов змеевика потока №4 печи П-1/2 в 2007 г.: проведена замена отвода 90° 152×12 концевой трубы №31 и примыкающего участка трубы 0.5 м после отвода, заменяемые элементы выделены оранжевым цветом; указанная причина замены – внутреннее утонение на внешней стороне отвода, остаточная толщина 7.2 мм; срок эксплуатации отвода с 2005 г.



Рис. 9. Схема выполнения замен элементов змеевика потока №4 печи П-1/2 в 2012 г.: проведена замена второй половины отвода 180° 152×12 и примыкающего участка трубы №24 по ходу движения среды; указанная причина замены – внутреннее утонение на внешней стороне отвода, остаточная толщина 5.6–6.0 мм; срок эксплуатации отвода с 2009 г.

Специфика течения в горизонтальных трубах состоит в том, что здесь всегда наблюдается несимметричность в распределении фаз по сечению канала. При фазовом расслоении в горизонтальных трубах паровая и жидкая фазы начинают двигаться со значительно различающимися скоростями. Возникает ситуация, когда сечение для движения жидкой фазы значительно уменьшается и скорость ее движения увеличивается, что способствует эрозии стенки змеевика. Это в большей степени характерно для концевых по ходу движения среды горизонтальных труб змеевиков, для которых наблюдается дисперсно-кольцевой режим течения.

Для змеевиков печей П-1/2 и П-1/3 работы по замене, которые проводились в 2008 и 2007 гг. соответственно, т.е. уже после 5-6 лет эксплуатации ограничивались заменами до конических переходов Ду150/200 трансферных трубопроводов, непосредственно подсоединяемых к выходным трубам змеевиков. Это обусловлено наибольшим количеством паровой фазы для них, наибольшей скоростью движения жидкой фазы и более сильному эрозионному износу. В ходе эксплуатации такие работы проводились и для других труб змеевиков (рис. 1).

Для выявления возможных причин ЭКИ, обусловленных высокими скоростями потоков, был выполнен гидравлический расчет для последовательно соединенных змеевиков конвекционной и радиационной секций.

Исходные данные приняты на основании средних фактических показателей работы печи П-1/2. Использовались приближенный к фактическому состав и плотность отбензиненной нефти. Упрощенная расчетная схема для одного потока показана на рис. 10. На каждом из участков змеевиков конвекционной и радиационной секций и трансферных трубопроводов (до и после печи) предусматривалось определенное количество местных сопротивлений, обусловленных количеством труб и отводов в соответствии с паспортными данными. Змеевик радиантной секции разбит на 3 участка L4, L5 и L6 с целью более точной локализации изменения скорости потока в концевых трубах змеевика (количество труб для каждого потока в секции радиации составляет 15 ед.). L5 и L6 состоят только из двух горизонтальных труб, соединенных поворотом на 180°. Для каждой из секций печи и участков змеевика задавалась определенная тепловая нагрузка в соответствии с тепловой мощностью горелок, их распределением и формой факела пламени. Толщина изоляции для трансферных трубопроводов принималась равной 100 мм, а температура окружающей среды 0 °С.

В табл. 2 приведены результаты расчета для одного потока существующего змеевика печи в условиях типового режима работы установки.

Из таблицы видно, что на конечных трубах змеевика (участки L5 и L6 расчетной схемы) и трансферного трубопровода (участки L7 и L8 расчетной схемы) наблюдается дисперсно-кольцевой режим движения двухфазного потока.

Средние скорости потока достигают высоких значений 20–46 м/с именно на конечных трубах радиантной секции, где массовая доля отгона паровой фазы превышает 0.33, что подтверждает заключение о том, что основной причиной ЭКИ являются высокие скорости движения парожидкостного потока в них.

Проведенные расчеты показывают, что начало процесса интенсивного парообразования в трубах змеевика печи начинается не далее, чем с 4-й (счет с конца потока) трубы для каждого отдельного потока.

Анализ результатов проведенных ревизий змеевиков печей П-1/2 и П-1/3 позволил сделать вывод, что, несмотря на имеющиеся процессы интенсивного ЭКИ, их эксплуатация проходила без осложнений. Согласно имеющейся технической документации на протяжении 12 лет, с 2008 по 2020 гг. новых случаев разгерметизации змеевиков не было зафиксировано.

При периодических ревизиях проводились замеры остаточных толщин элементов змеевиков, при этом особое внимание уделялось концевым участкам труб змеевиков и отводам, а также прилегающим к ним участкам по ходу движения рабочей среды, что позволяло своевременно выявлять и заменять элементы со значительным утонением.

При первоначальных толщинах труб в 8 мм и отводов в 12 мм обеспечивалось надежное выявление локальных утонений в 5.0–7.0 мм в местах, обнаруженных при проведении предыдущих ревизий.

Начиная с 2015 г. периодичность проведения ревизий и капитальных ремонтов оборудования установки была увеличена с 1 года до 2 лет, что привело к ситуации, когда в местах интенсивного ЭКИ запас по толщинам стенок змеевиков печей П-1/2 и П-1/3 оказался недостаточным для 2-х

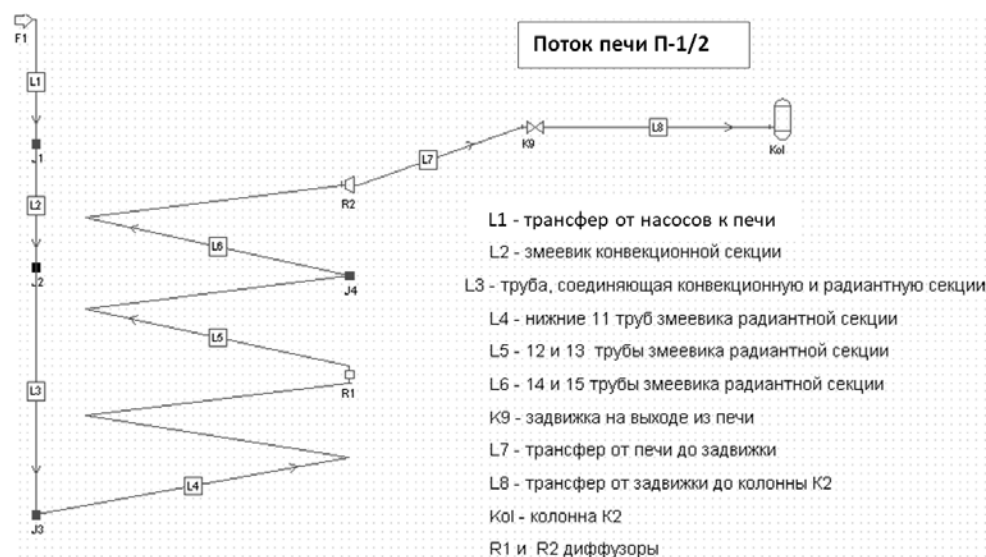


Рис. 10. Расчетная схема для одного потока

Результаты гидравлического расчета змеевика печи П-1/2 (типовой режим работы)

Участок змеевика переход, арматура	Длина, м	Дн, мм	Режим течения	Скорость средняя, м/с	Плотность, кг/м ³			Вязкость средняя, сСт	Массовая доля отгона		Давление абс., кПа		Температура, °С	
					пар	жид-кость	смесь		Вход	Выход	Вход	Выход	Вход	Выход
L1	75.0	152	Hom	2.33	-	575	575	0.222	0	0	926	812	240	240
L2	275.0	152	Hom	2.47	-	575	510	0.183	0	0	812	757	240	313
L3	8.0	152	Hom	2.63	-	510	510	0.144	0	0	757	793	313	313
L4	50.0	152	AD	9.34	31	496	144	0.0405	0	0.327	793	586	313	371
Диффузор R1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L5	50.0	152	AD	22.7	24	488	59	0.0194	0.327	0.423	586	478	371	372
L6	1.0	152	AD	35.5	20	549	38	0.0149	0.423	0.568	478	320	372	368
Диффузор R2	0.5	152×219	AD						0.568	0.556	320	337	368	369
L7	5.0	219	AD	26.0	17	508	30	0.0133	0.556	0.564	337	327	369	369
Задвижка K9	0.5	219	AD						0.564	0.624	327	261	369	365
L8	100.0	219	AD	49.0	12	533	16	0.0107	0.624	0.833	261	100	365	349

Режимы течения: Hom – гомогенный; AD – дисперсно-кольцевой.

летнего межремонтного пробега, что подтверждается произошедшими случаями разгерметизации змеевиков в 2020 и 2023 гг.

Для снижения риска возникновения разгерметизации змеевиков печей П-1/2 и П-1/3 необходимо было выполнить мероприятия, без которых дальнейшее увеличение межремонтного пробега установки будет невозможно.

При текущем режиме эксплуатации установки уменьшение ЭКИ змеевиков печей может быть обеспечено одним из следующих вариантов:

- увеличение прибавки на коррозию (определенной по результатам эксплуатации). Учитывая высокие значения скорости износа, данный вариант представляется нецелесообразным, поскольку потребуются значительное увеличение исполнительных толщин элементов змеевиков;

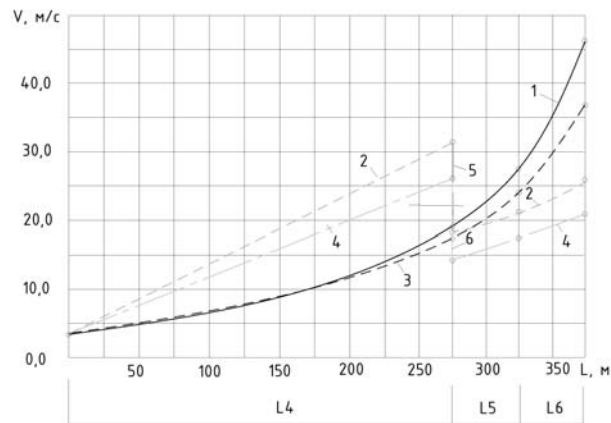
- организация узлов промежуточного отбора паровой фазы. Для жестких условий эксплуатации змеевиков такое решение представляет сложность из-за необходимости разработки надежных узлов отбора паровой фазы;

- увеличение диаметра концевых труб змеевика. Данное техническое решение ограничено невозможностью размещения труб большего диаметра, обеспечивающих требуемую поверхность восприятия радиационного излучения в условиях ограниченного печного пространства;

- повышение давления в змеевиках за счет повышения гидравлического сопротивления выходного трансферного трубопровода, обеспечивающее смещение зоны повышенной доли отгона к выходу змеевика, вследствие чего основное образование паровой фазы будет происходить в трансферном трубопроводе, а скорости потока в змеевике будут более низкими.

На рис. 11 приведены графики изменения средней скорости потока по длине змеевика для

радиантной секции печи для рассмотренных выше вариантов.



Участки радиантной секции змеевика в соответствии с расчетной схемой

Рис. 11. Графики изменения средней скорости потоков (V) по длине змеевика (L) радиантной секции печи: 1 – текущий режим работы существующего змеевика; 2 – режим работы для змеевика с увеличенным диаметром 4-х концевых труб в радиантной секции; 3 – режим работы существующего змеевика с увеличенным давлением за счет частичного прикрытия задвижки на выходе змеевика; 4 – режим работы для змеевика с увеличенным диаметром 4-х концевых труб в радиантной секции и с увеличенным давлением за счет частичного прикрытия задвижки на выходе змеевика; 5 и 6 – изменение скорости потока внутри диффузоров R1 и R2

При анализе вариантов режимов течения можно сделать вывод о сложностях достижения решения поставленной задачи.

Вариант простого увеличения диаметра 4-х концевых труб (с Ду150 до Ду200) приводит к снижению средних скоростей движения парожидкостной смеси в этих трубах, но при этом изменяется режим течения в предыдущих трубах со значительным увеличением средней скорости потока.

Вариант увеличения давления в змеевике за счет частичного прикрытия задвижки на выходе

показывает незначительное влияние на режим течения среды с высокой средней скоростью.

Наиболее выгодным представляется режим работы для змеевика с увеличенным диаметром 4-х концевых труб в радиантной секции и с увеличенным давлением за счет частичного прикрытия задвижки на выходе змеевика, но и в этом случае изменяется режим течения в предыдущих трубах со значительным увеличением средней скорости потока.

Поскольку интенсивный износ элементов змеевиков имеет преимущественно локальный характер, полностью исключить его возникновение за счет изменения режима течения не представляется возможным.

Наиболее оптимальными представляется следующие технические решения.

1. Изменение материального исполнения змеевиков. Для обеспечения текущего режима эксплуатации печей с предотвращением разгерметизации змеевиков в необходимо проведение реконструкции с заменой 4-х концевых по ходу движения среды труб с примыкающими отводами для каждого потока с изменением материального исполнения труб. Целесообразно применение труб из перлитных сталей (13X9M, 12X8BФ или их импортных аналогов X12CrMo9-1, 1.7386) с повышенным содержанием хрома, что повысит коррозионную стойкость материала, обеспечив эксплуатацию в текущих условиях со снижением риска возникновения аварийных ситуаций.

Для перлитных сталей в обеспечении коррозионной стойкости важную роль играет фактор накопления продуктов коррозии на поверхности металла, которые защищают ее от быстрого разрушения. В случае достаточно высоких скоростей потока жидкой среды продукты коррозии, имеющие сравнительно слабое сцепление с металлом, могут отслаиваться и уноситься потоком жидкости, и поверхность металла остается доступной подвергается усиленной коррозии, что определяется как ЭКИ. Для повышения стойкости к ЭКИ в условиях дальнейшего планируемого увеличения межремонтного пробега рекомендуется применение нержавеющей сталей.

В зарубежной научно-технической литературе имеются сведения о применении нержавеющей сталей «Type 316» и «Type 317», приближенным отечественным аналогом которых является сталь 10X17H13M2T, для змеевиков печей установок первичной переработки нефти (АТ, АВТ) ^{11, 12}. Также может быть рекомендовано применение сталей марок 08X18H10T, 10X17H13M2T или 10X17H13M3T. По стойкости к МКК более предпочтительна сталь 08X18H10T.

Следует учитывать, что предлагаемые аустенитные стали в остановочный период подвергаются действию полиотионовых кислот, образующихся при окислении сульфидов железа в присутствии влаги. В результате протекает процесс межкристаллитной коррозии (МКК), вследствие чего не допускается пропарка, промывка оборудования. При остановке оборудования до проведения ремонтных работ рекомендуется промывка щелочным раствором ¹³, а также удаление кислорода воздуха и воды с помощью продувки сухим азотом.

2. Конструктивное усовершенствование поворотов змеевиков. Для изготовления петель змеевиков с большим расстоянием между горизонтальными участками можно использовать отводы с большим радиусом и отказаться от вертикальных участков на них (рис. 12). Это позволит уменьшить действие центробежных сил. Из рис. 1–4 и 8 видно, что для участков с крутоизогнутыми отводами и вертикального прямого участка трубы часто возникают утонения, в которых происходит разгерметизация змеевиков и для которых проводятся многочисленные замены. Реконструкция с заменой конфигурации позволит уменьшить ЭКИ.



Рис. 12. Схема конструктивного выполнения узла поворота потока с применением отводов 180° с увеличенным радиусом закругления $R = 3D$ (выделен оранжевым)

Вместо отводов постоянного радиуса кривизны можно использовать отводы с переменным радиусом кривизны ¹⁴, обеспечивающие взаимодействие парожидкостного потока со стенкой отвода на большей поверхности, за счет чего снижается локальный ЭКИ.

Таким образом, причинами интенсивного ЭКИ элементов в узлах поворота потока и на конечных участках змеевиков трубчатых печей из хромомолибденовых сталей являются высокие скорости движения двухфазной среды, обусловленные большим количеством паровой фазы во внутреннем пространстве змеевиков, фазовое расслоение двухфазной среды в конце протяженных горизонтальных участков труб и существенный рост центробежных сил на отводах.

Увеличение межремонтных пробегов технологических печей целесообразно обеспечивать за счет использования коррозионно-стойких материалов и конструктивного усовершенствования

Литература

1. РТМ 26-02-39-84 Методы защиты от коррозии. Выбор материалов для основных элементов и узлов аппаратов установок подготовки и первичной переработки нефти. – М.: Минхимнефтемаш, 1984.
2. Шарихин В.В., Ентус Н.Р., Коновалов А.А., Скороход А.А. Трубчатые печи нефтегазопереработки и нефтехимии. – М.: Химия, 2000. – 394 с.
3. Саакян Л.С., Ефремов А.П. Защита нефтегазопромыслового оборудования от коррозии. – М.: Недра, 1982. – 227 с.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 713 с.
5. Берлин М.А. Износ основных элементов трубчатых печей. – М.: Недра, 1964. – 102 с.
6. Бад'ин Ю.А. Необходимость учета фазовой неоднородности нагреваемых сред при обеспечении промышленной безопасности эксплуатации трубчатых печей предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической отрасли // Химическая техника. – 2015. – №3. – 7 с.
7. Бад'ин Ю.А. Повреждение змеевиков промышленных нагревательных печей вследствие фазового расслоения нагреваемой среды // Нефтегазовое дело. – 2021. – №4. – С.121-131.
8. Бад'ин Ю.А., Ящук В.М. Исследование причин повреждений змеевиков технологических печей в участках труб, примыкающих к узлам поворота потоков // Баш. хим. ж. – 2021. – Т.28, №2. – С.81-86.
9. Теплоэнергетика и теплотехника / Под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 552 с.
10. Баттерворс Д., Хьюитт Г. Теплопередача в двухфазном потоке. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
11. Электронный ресурс: www.corrosionclinic.com/corrosion_courses_brochure.
12. Каталог аналогов импортных и отечественных основных и сварочных материалов, применяемых при изготовлении сосудов, аппаратов и трубопроводов, подведомственных Госгортехнадзору. – Волгоград: ОАО «ВНИИПТхимнефтеаппаратуры», 2008. – 168 с.
13. NACE RP0170-2004. Standard Recommended Practice. Protection of Austenitic Stainless Steels and Other Austenitic Alloys from Polythionic Acid Stress Corrosion Cracking During Shutdown of Refinery Equipment.
14. Патент №2814319 РФ. Отвод трубопровода для транспортировки многофазного потока / О.В. Горчаков, А.Н. Киселев, Ю.А. Бад'ин, В.М. Ящук // Б.И. – 2024. – №7.

References

1. RTM 26-02-39-84 *Metody zashchity ot korrozii. Vybór materialov dlya osnovnykh elementov i uzlov apparatov ustanovok podgotovki i pervichnoy pererabotki nefi* [Methods of Corrosion Protection. Selection of Materials for the Main Elements and Units of Oil Treatment and Primary Refining Units]. Moscow, Minkhimneftemash Publ., 1984.
2. Sharikhin V.V., Entus N.R., Konovalov A.A., Skorokhod A.A. *Trubchatyye pechi neftegazopererabotki i neftekhimii* [Furnaces of Oil and Gas Refining and Petrochemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 2000, 394 p.
3. Saakyan L.S., Efremov A.P. *Zashchita neftegazopromyslovogo oborudovaniya ot korrozii* [Corrosion protection of oil and gas field equipment]. Moscow, Nedra Publ., 1982, 227 p.
4. Shlikhting G. *Teoriya pogranichnogo sloya* [Boundary layer theory]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 713 p.
5. Berlin M.A. *Iznos osnovnykh elementov trubchatykh pechey* [Wear of the main elements of tubular furnaces]. Moscow, Nedra Publ., 1964, 102 p.
6. Bad'in Yu.A. *Neobkhodimost' ucheta fazovoy neodnorodnosti nagrevayemykh sred pri obespechenii promyshlennoy bezopasnosti ekspluatatsii trubchatykh pechey predpriyatiy neftepererabatyvayushchey i neftekhimicheskoy otrasli* [The Need to Take into Account the Phase Heterogeneity of Heated Media When Ensuring Industrial Safety of Operation of Tubular Furnaces at Oil Refining and Petrochemical Industries]. *Khimicheskaya tekhnika* [Chemical Engineering], 2015, no.3, 7 p.
7. Bad'in Yu.A. *Povrezhdeniye zmeeyevikov promyshlennykh nagrevatel'nykh pechey vslledstviye fazovogo rassloeniya nagrevayemoy sredy* [Damage to coils of industrial heating furnaces due to phase separation of the heated medium]. *Neftegazovoye delo* [Oil and Gas Business], 2021, no.4, pp.121-131.
8. Bad'in Yu.A., Yashchuk V.M. *Issledovaniye prichin povrezhdeniy zmeeyevikov tekhnologicheskikh pechey v uchastkakh trub, primykayushchikh k uzlam povorota potokov* [Study of the causes of damage to coils of process furnaces in pipe sections adjacent to flow turning units]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2021, vol.28, no.2, pp.81-86.
9. *Teploenergetika i teplotekhnika* [Thermal power engineering and heating engineering]. Ed. V.A. Grigor'yev, V.M. Zorina. Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 552 p.
10. Battervors D., Kh'yuit G. *Teploperedacha v dvukhfaznom potoke* [Heat transfer in two-phase flow]. Moscow, Energiya Publ., 1980, 328 p.
11. www.corrosionclinic.com/corrosion_courses_brochure
12. *Katalog analogov importnykh i otechestvennykh osnovnykh i svarennykh materialov, primenyayemykh pri izgotovlenii sosudov, apparatov i truboprovodov, podvedomstvennykh Gosgortekhnadzoru* [Catalog of analogs of imported and domestic base and welding materials used in the manufacture of vessels, apparatuses, and pipelines under the jurisdiction of Gosgortekhnadzor]. Volgograd, ОАО «VNIIPThimnefteapparatury» Publ., 2008, 168 p.
13. NACE RP0170-2004. [Standard Recommended Practice. Protection of Austenitic Stainless Steels and Other Austenitic Alloys from Polythionic Acid Stress Corrosion Cracking During Shutdown of Refinery Equipment].
14. Gorchatov O.V., Kiselev A.N., Bad'in Yu.A., Yashchuk V.M. *Otvod truboprovoda dlya transportirovki mnogofaznogo potoka* [Pipeline branch for transporting multiphase flow]. Patent RF no.2814319, 2024.