ПОВРЕЖДЕНИЕ ЗМЕЕВИКОВ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ИЗ-ЗА ФАЗОВОГО РАССЛОЕНИЯ НАГРЕВАЕМОЙ СРЕДЫ

DAMAGING PROCESS FOR COILS OF FIRED HEATERS DUE TO PHASE SEPARATION OF HEATED PRODUCT

Ю. А. Бадьин

Yurii A. Badin

Всероссийский
научно-исследовательский
и конструкторско-технологический
институт оборудования
нефтеперерабатывающей
и нефтехимической
промышленности,
г. Волгоград, Российская Федерация

All-Russian Research
and Design Institute of Equipment
for the Oil Refining
and Petrochemical Industry,
Volgograd, Russian Federation

При эксплуатации нагревательных трубчатых печей с огневым обогревом в ряде случаев происходят повреждения основного металла и сварных соединений змеевиков, несущие риск пропуска горючего продукта и пожара. До сих пор не дано расчетного обоснования возникновения повреждений основного металла и сварных соединений змеевиков печей в виде растрескивания. Как правило, в качестве механизма повреждения предлагается коррозионное растрескивание от воздействия различных рабочих сред или ошибки технического персонала. Ограничение рассматриваемых механизмов повреждения не дает возможности разработки эффективных мер предотвращения повреждений. Актуальной является задача расчетного обоснования возникновения повреждений, предметом чего является настоящая статья. Для достоверности рассмотрение проводится на примере трубчатой печи создания горячей струи в вакуумной колонне установки АВТ. На 4-ом году эксплуатации на змеевике печи произошел прогар по основному металлу выходной трубы змеевика. В статье предлагается механизм повреждения змеевиков печей вследствие процесса расслоения парожидкостной смеси в горизонтальных трубах. Поскольку коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к газовой фазе по сравнению с жидкой фазой значительно меньше, то теплосъем в верхней части трубы затрудняется, что обуславливает повышенную температуру стенки и перепад температур между верхней и нижней частями труб. Изложение иллюстрируется результатами тепловизионного контроля печи и осмотра поврежденной трубы. Рассматривается модель образования внутренних усилий вследствие стесненности температурных деформаций в условиях перепада температур. В статье поставлена и решена задача напряженно-деформированного состояния металла при возникновении дополнительных нагрузок вследствие образования перепада температур из-за явления фазового расслоения продукта в горизонтальных трубах. Расчетное исследование указывает на виды и места повреждений труб, обусловленные явлением фазового расслоения нагреваемого продукта, результаты исследования подтверждаются данными эксплуатации.

Ключевые слова

трубчатые нагревательные
печи с огневым обогревом;
фазовое расслоение;
механизм повреждения;
напряженно-деформированное
состояние

During the operation of heating tube furnaces with fire heating, in some cases, damage to the base metal and welded joints of the coils occurs, which carries the risk of leakage the combustible product and fire. So far, no calculated justification has been given for the occurrence of damage to the base metal and welded joints of the furnace coils in the form of cracking. As a rule, corrosion cracking from exposure to various heated products or errors of technical personnel is suggested as a damage mechanism. Limiting the damage mechanisms under consideration does not make it possible to develop effective damage prevention measures. The actual problem is the calculation justification of the occurrence of damage, the subject of which is this article. For reliability, the consideration is carried out on the example of a tubular furnace for creating a hot jet in the vacuum column of the CDU. During the 4th year of operation, the base metal of the output pipe of the coil on the furnace coil was burned through. The article suggests the mechanism of damage to the furnace coils due to the process of separation of the vapor-liquid mixture in horizontal pipes. Since the coefficient of heat transfer from the pipe wall to the gas phase is much lower compared to the liquid phase, the heat transfer in the upper part of the pipe is difficult, which causes an increased temperature of the pipe wall and a temperature difference between the upper and lower parts of the pipe. The presentation is illustrated by the results of thermal imaging inspection of the furnace and inspection of the damaged pipe. A model of the formation of internal forces due to the tightness of temperature deformations under conditions of temperature differences is considered. The article presents and solves the problem of the stress-strain state of the metal in the event of additional loads due to the formation of a temperature difference due to the phenomenon of phase separation of the heated product in horizontal pipes. The calculated study indicates the types and places of pipe damage caused by the phenomenon of phase separation of the heated product, the results of the study are confirmed by the operating data.

Введение

При эксплуатации нагревательных трубчатых печей с огневым обогревом в ряде случаев происходят повреждения основного металла и сварных соединений змеевиков, несущие риск пропуска горючего продукта и пожара. До сих пор не дано расчетного обоснования возникновения повреждений основного металла и сварных соединений змеевиков печей в виде растрескивания. Как правило, в качестве механизма повреждения предлагается коррозионное растрескивание от воздействия различных рабочих сред или ошибки технического персонала. Ограничение рассматриваемых механизмов повреждения не дает возможности разработки эффективных мер предотвращения повреждений. Актуальной является задача расчетного обоснования возникновения повреждений, предметом чего является настоящая статья.

Для достоверности рассмотрим данный вопрос на примере трубчатой печи П-4 создания горячей струи в вакуумной колонне установки АВТ. Коробчатая печь имеет змеевик, горизонтальные трубы которого расположены на стенах. Горелки установлены в полу печи, направление движения дымовых газов снизу вверх. Змеевик камеры радиации собирается с последовательным увеличением диаметра по ходу движения среды. Трубы змеевика со-

Keywords

tube fired heaters;
phase separation;
mechanism of damage;
stress-strain state

бираются из частей с помощью кольцевых швов. Данные печи приведены в таблице 1.

Характер и причины повреждений

На 4-ом году эксплуатации в змеевике печи произошел прогар по основному металлу. Для исследований металла была осуществлена вырезка образца с кольцевым сварным швом из выходной трубы с размерами $\varnothing 323,7 \times 10,1$. При осмотре образца было выявлено растрескивание в сварном шве с внутренней стороны. Сечения с дефектами группируются в верхней половине трубы (№ 1, 2), в нижней половине дефекты отсутствуют (№ 3, 4) (рисунки 1, 2). Верхняя часть трубы с наружной стороны имеет более темный цвет относительно нижней половины и более толстый слой окалины. Это свидетельствует о воздействии высокой температуры на верхнюю половину трубы (рисунок 3). Перегрев верхней части трубы, соответствующей объему, занятому паровой фазой, четко определяется по наличию слоя окалины, по цвету отличающейся от нижней части трубы; четко видно расположение линии раздела фаз.

Результаты проведенного тепловизионного контроля и схема змеевика камеры радиации аналогичной вакуумной печи П-2 установки АВТ (таблица 2) показаны на рисунках 4, 5.

Таблица 1. Данные печи П-4 установки АВТ

Параметр	Значение
Рабочее давление на входе в камеру конвекции	95–190 кПа
Давление на входе в вакуумную колонну	не более 11 кПа
Температура на входе/выходе труб в камеру/из камеры радиации	360/415 °С
Нагреваемая среда	мазут
Габариты печи $L \times B \times H$	$15,8 \times 5,6 \times 8,0$ м
Наружный диаметр и толщина труб змеевика камеры радиации, Дн х S, мм	$\varnothing 88,9 \times 5,5$; $\varnothing 114,3 \times 6$; $\varnothing 219,1 \times 8,2$; $\varnothing 273,0 \times 9,2$; $\varnothing 323,7 \times 10,1$
Материал змеевиков	зарубежный аналог стали 15Х5М
Материал сварных швов	электроды ЦЛ-17 типа Э-10Х5МФ
Проектный срок эксплуатации	12 лет или 100 тыс. ч

Рисунок 1. Расположение сечений № 1–4 кольцевого сварного шва относительно линии раздела фаз жидкости и газа

а)

б)

Рисунок 2. Сечение сварного соединения: в верхней части труб, растрескивание с внутренней стороны на глубину до 30 % толщины (а); в нижней части труб, дефекты отсутствуют (б)

Рисунок 3. Вырезанный образец

Рисунок 4. Результаты тепловизионного контроля, стрелкой показано наличие фазового расслоения продукта с образованием линии раздела фаз для выходной трубы змеевика

Рисунок 5. Схема организации потоков печи в камере радиации; показана область тепловизионного контроля

Таблица 2. Данные печи П-2 установки АВТ

Параметр	Значение
Рабочее давление на входе в камеру конвекции	не более 70 кПа
Давление на входе в вакуумную колонну	не более 80 кПа
Температура на входе/выходе труб в камеру/из камеры радиации	345/400 °С
Нагреваемая среда	мазут
Габариты печи $L \times B \times H$	$14,8 \times 6,5 \times 8,0$ м
Наружный диаметр и толщина труб змеевика камеры радиации, $D_n \times S$, мм	$\varnothing 89 \times 6$; $\varnothing 273 \times 10$; $\varnothing 325 \times 12$
Материал змеевиков	15Х5М
Материал сварных швов	электроды ЦЛ-17 типа Э-10Х5МФ
Проектный срок эксплуатации	12 лет или 100 тыс. ч

Результаты тепловизионного контроля и осмотра вырезанного образца позволили предположить, что причиной прогара служит процесс расслоения парожидкостной смеси в горизонтальных трубах. Для понимания причин растрескивания следует рассмотреть модель образования внутренних усилий вследствие стесненности температурных деформаций в условиях перепада температур между верхней и нижней частями трубы.

При тепловизионном обследовании печей часто фиксируются случаи фазового расслоения нагреваемого продукта в горизонтальных трубах змеевика [1]. Поскольку коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к газовой фазе по сравнению с жидкой фазой значительно меньше (более чем в 10 раз) [2], то теплосъем в верхней части трубы затрудняется, что обуславливает повышенную температуру стенки и перепад температур между верхней и нижней частями труб. Труба представляет собой цельную конструкцию, из-за чего возникает

ситуация стесненности температурных деформаций верхней части труб относительно нижней части в продольном и окружном сечениях трубы. Из-за стесненности температурных деформаций верхняя часть будет испытывать напряжения сжатия, а нижняя — растяжения. Внутренние усилия в трубах образуются как в продольном, так и в окружном направлениях (рисунок 6). Для определения напряженно-деформированного состояния материала будут рассмотрены оба случая.

Определение внутренних усилий в продольном направлении

В этом случае используется расчетно-аналитический подход, развиваемый на основе теории биметаллических пластин [3]. Рассматривается цилиндрический элемент, выделенный двумя поперечными сечениями из трубы (рисунки 7 и 8), свободной от внешних силовых нагрузок.

Рисунок 6. Образование внутренних усилий в трубе от перепада температур между верхней и нижней частями: продольное сечение (а); поперечное сечение (б)

Исходными данными для расчета являются геометрические размеры трубы (наружный и внутренний радиусы трубы R_n и R_o), температуры верхней и нижней частей трубы (соответственно t_1 и t_2), материал трубы и физико-механические свойства материала при расчетных температурах верхней и нижней частей (коэффициенты линейного расширения α_1 и α_2 , модули продольной упругости E_1 и E_2), а также высота уровня линии раздела фаз относительно серединной линии трубы (y_o). Целью расчета является определение внутренних усилий в трубе послойно в зависимости от расположения слоя относительно линии раздела фаз.

Подход к решению состоит в том, что деформацию произвольного слоя металла трубы можно представить в виде суммы температурной и упругой деформаций: $\varepsilon = \varepsilon_t + \varepsilon_y$.

При нагреве трубы, частично заполненной жидкостью, до температуры верхней части (t_1) и температуры нижней части (t_2) труба искривляется. Сечения трубы, оставаясь плоскими, поворачиваются относительно друг друга на угол dV , и полное относительное удлинение произвольного слоя А-А', находящегося на расстоянии y от линии раздела фаз, будет:

$$\varepsilon = \varepsilon_o + y \frac{dV}{dz} - \alpha \cdot t = \varepsilon_o + y \frac{1}{\rho} - \alpha \cdot t, \quad (1)$$

где ε_o — деформация слоя трубы на уровне линии раздела фаз;

$\frac{dV}{dz}$ — изменение кривизны трубы;

ρ — радиус кривизны;

t — температура слоя трубы.

Напряжения, действующие в слое, расположенном на расстоянии y от линии раздела фаз, для верхней и нижней частей трубы определяются по формулам:

$$\sigma_1 = E_1 \left[\varepsilon_o + y \frac{1}{\rho} - \alpha_1 \cdot t_1 \right] \quad (0 \leq y \leq h_1); \quad (2)$$

$$\sigma_2 = E_2 \left[\varepsilon_o + y \frac{1}{\rho} - \alpha_2 \cdot t_2 \right] \quad (-h_2 \leq y \leq 0). \quad (3)$$

Величины ε_o и $\frac{1}{\rho}$ находим из условий равновесия, то есть равенства нулю нормального усилия N и изгибающего момента M в поперечном сечении трубы:

$$N = \int_{F1} \sigma_1 dF + \int_{F2} \sigma_2 dF = 0; \quad (4)$$

$$M = \int_{F1} \sigma_1 y dF + \int_{F2} \sigma_2 y dF = 0. \quad (5)$$

Здесь $F1$ и $F2$ — площади поперечных сечений верхней и нижней частей трубы (расположенных сверху и снизу относительно линии раздела фаз). После преобразований получено:

$$\varepsilon_o = \frac{1}{E_1 S_1 + E_2 S_2} \left[E_1 S_1 \alpha_1 t_1 + E_2 S_2 \alpha_2 t_2 - \frac{1}{\rho} (E_1 Q_1 - E_2 Q_2) \right]; \quad (6)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{(E_1 Q_1 \alpha_1 t_1 - E_2 Q_2 \alpha_2 t_2) - \frac{E_1 Q_1 - E_2 Q_2}{E_1 S_1 + E_2 S_2} (E_1 S_1 \alpha_1 t_1 + E_2 S_2 \alpha_2 t_2)}{(E_1 J_1 + E_2 J_2) - \frac{E_1 Q_1 - E_2 Q_2}{E_1 S_1 + E_2 S_2} (E_1 Q_1 - E_2 Q_2)}. \quad (7)$$

Здесь S_1, Q_1, J_1 — площадь, статический момент и момент инерции верхнего поперечного сечения трубы соответственно;

S_2, Q_2, J_2 — то же самое для нижнего поперечного сечения трубы.

Статические моменты инерции сечений определяются по формулам:

$$Q_1 = \int_{F1} (y - y_o) dF; \quad (8)$$

$$Q_2 = \int_{F2} (y - y_o) dF. \quad (9)$$

Моменты инерции сечений определяются по формулам:

$$J_1 = \int_{F1} (y - y_o)^2 dF; \quad (10)$$

$$J_2 = \int_{F2} (y - y_o)^2 dF. \quad (11)$$

Расчетно-аналитический метод позволяет определить следующие основные расчетные точки при проведении расчетов на прочность:

А — верхняя наружная точка трубы;

В — верхняя внутренняя точка трубы;

С — наружная точка трубы на линии раздела фаз (также точки C'_1 и C'_2 на уровне выше и ниже линии раздела фаз соответственно на 10 мм);

Д — внутренняя точка трубы на линии раздела фаз (также точки D'_1 и D'_2 на уровне выше и ниже линии раздела фаз на 10 мм);

Е — нижняя наружная точка трубы;

Ф — нижняя внутренняя точка трубы.

Выбор сечений А-В и Е-Ф обоснован возможностью наличия там значительных напряжений от действия изгибающих моментов (расчетные точки удалены на максимальные расстояния от нейтральной линии изгиба); выбор сечения С-Д обосновывается возможностью наличия там значительных напряжений растяжения от стесненности температурных деформаций в осевом направлении трубы, поскольку сжимающие напряжения изгиба для данного сечения отсутствуют.

После определения общих параметров деформации трубы на линии раздела фаз (ε_o) и радиуса кривизны изгиба (ρ) по формулам (7) и (8), становится возможным по формулам (2) и (3) определить значения напряжений послойно для верхней и нижней частей трубы

h_1 и h_2 — расстояния от линии раздела фаз до верхней и нижней точек сечения соответственно

Рисунок 7. Расчетная схема задачи определения внутренних усилий в трубах в продольном направлении

соответственно. Под действием образовавшихся нагрузок материал будет испытывать дополнительное нагружение. При расчете на прочность будет проведена проверка условий прочности для расчетных точек. В силу сложности аналитических формул решение проводится с помощью авторской компьютерной программы.

Определение внутренних усилий в поперечном сечении трубы

Верхняя нагретая часть трубы в ходе температурного расширения вначале не получает изгибных напряжений, но изгиб нижней части приводит к изгибу верхней. Нагрузками будут усилие P_p и изгибающий момент в окружном сечении M_p (рисунок 7). Для постановки задачи определения внутренних усилий используется аналогия нагружения цилиндрической оболочки как плоской стержневой системы. Для решения используется метод конечных элементов (МКЭ) [4, 5].

При решении определяются перемещения узлов, внутренние силовые факторы и напряжения. На рисунке 9 показано разбиение стержневой системы на конечные элементы (КЭ) с пронумерованными обобщенными перемещениями в глобальной системе отсчета. Расчетная схема состоит из достаточно большого количества (20) конечных элементов. Имеется 2 опорных узла, дающих возможность системе свободно деформироваться.

Температурные деформации КЭ воспроизводятся с помощью следующего приема: для них условно прикладываются в узлах силы

Рисунок 8. Расчетная схема задачи определения внутренних усилий в продольном направлении трубы

растяжения с противоположным направлением, от воздействия которых они получают удлинение, по величине соответствующее температурному расширению $\Delta l = NF = \alpha \cdot l \cdot \Delta T$, где N — силовое усилие в конечном элементе; F и l — площадь сечения и длина конечного элемента; α — коэффициент линейного расширения материала; ΔT — температурный перепад.

Рисунок 9. Расчетная схема задачи определения внутренних усилий в поперечном сечении трубы методом конечных элементов

Из полученных внутренних усилий для таких конечных элементов вычитается значение N с целью получения действительного внутреннего усилия. Часть окружности трубы, имеющая повышенную температуру, аппроксимируется тем, что конечные элементы в

этой части условно подвергаются воздействию внешней растягивающей силы N . Например, для случая заполнения трубы жидкостью наполовину нагружению такого вида будут подвергаться конечные элементы № 6–15 (рисунок 9).

Исходные численные данные

Внутреннее давление в трубах (среднее значение давления на входе и выходе змеевика) $P = 0,1$ МПа;

Наружный диаметр трубы $D_n = 323,7$ мм;

Исполнительная толщина стенки трубы $S = 10,1$ мм;

Прибавка на коррозию и эрозию $C = 1$ мм.

Температуры наружной поверхности трубы приняты по результатам тепловизионного контроля аналогичной печи: для верхней части $T_1 = 620$ °С; для нижней части $T_2 = 560$ °С.

Коэффициент линейного расширения стали 15Х5М для температур верхней и нижней частей трубы: $\alpha_1 = 12,60 \cdot 10^{-6}$, $\alpha_2 = 12,24 \cdot 10^{-6}$ [6].

Модуль продольной упругости стали 15Х5М принят для верхней и нижней частей трубы [6] с применением интерполяции и аппроксимации: $E_1 = 0,91 \cdot 10^{11}$ Па; $E_2 = 1,19 \cdot 10^{11}$ Па.

Коэффициент теплопроводности материала для верхней и нижней частей трубы приняты: $\lambda_1 = \lambda_2 = 32$ Вт/м · К [6].

Допускаемые напряжения стали 15Х5М принимаются на фактическое время эксплуатации 3 года (25000 ч) согласно [7].

Расчет напряжений от внутреннего давления

Средний уровень окружных напряжений в трубе определяется по известной формуле:

$$\sigma_o = \frac{1}{2} \left(\frac{P \cdot D_n}{S - C} - P \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{0,1 \cdot 323}{10,1 - 1} - 0,1 \right) = 1,7 \text{ МПа.}$$

Средний уровень продольных напряжений в трубе от действия внутреннего давления определяется по формуле:

$$\sigma_n = 0,5 \sigma_o = 0,5 \cdot 1,7 \approx 0,9 \text{ МПа.}$$

Можно сделать вывод, что уровень напряжений в трубе от внутреннего давления очень низкий и не является причиной повреждений.

Определение температурных напряжений по толщине стенки

Так как для змеевиков печей температура наружной поверхности труб больше, чем внутренней, то необходимо провести оценку температурных напряжений. На наружной по-

верхности труб будут действовать напряжения сжатия, а на внутренней стороне — растяжения. Средний температурный перепад по толщине стенки находится по формуле:

$$\Delta T = q_o \cdot \frac{S}{\lambda_1} = 35000 \cdot \frac{10,1 \cdot 10^{-3}}{32} = 11,1 \text{ °С,}$$

где q_o — среднее допускаемое тепловое напряжение для печей данной конструкции и технологического процесса, принято согласно [8].

Из-за различия условий теплоотдачи принимается перепад температур для верхней и нижней частей соответственно 5 °С и 20 °С.

Верхняя часть трубы

Температура внутренней поверхности труб составит:

$$T_1^B = T_1^A - \Delta T = 620 - 5 = 615 \text{ °С.}$$

Величина температурных напряжений по формуле [9]:

$$\sigma_1^T = \frac{1}{2 \cdot (1 - \nu)} \alpha_1 \cdot E_1 \cdot \Delta T_1 = \frac{1}{2 \cdot (1 - 0,3)} 12,6 \cdot 10^{-6} \cdot 0,91 \cdot 10^{11} \cdot 5 = 4,1 \text{ МПа.}$$

В данном случае ν — коэффициент Пуассона для сталей, $\nu = 0,3$.

Нижняя часть трубы

Температура внутренней поверхности труб составит:

$$T_2^D = T_2^C - \Delta T = 560 - 20 = 540 \text{ °С.}$$

Величина температурных напряжений:

$$\sigma_2^T = \frac{1}{2 \cdot (1 - \nu)} \alpha_2 \cdot E_2 \cdot \Delta T_1 = \frac{1}{2 \cdot (1 - 0,3)} 12,24 \cdot 10^{-6} \cdot 1,19 \cdot 10^{11} \cdot 20 = 21,1 \text{ МПа.}$$

Расчетная схема задачи показана на рисунке 9, результаты представлены в таблице 3.

Расчет поперечного сечения трубы

Рассматривается случай $y_0 = 0$, заполнения трубы жидкостью наполовину. Результаты расчетов показаны в таблице 4, обозначения — на рисунке 9.

Все элементы находятся в растянутом положении, при этом напряжения оказываются небольшими по величине. Окружные напряжения определяются с учетом внутреннего давления. Например, для сечения $A-B$ (элемент № 10): $\sigma_{ol} = \sigma_{od} + \sigma_{om} = 1,7 + 1,5 = 3,2$ МПа.

Определение эквивалентных напряжений

Проводится по 4-й теории прочности. Результаты расчета приведены в таблице 5, где выделены случаи превышения эквива-

Таблица 3. Результаты расчета напряжений в продольном направлении

№	y_o , мм	K, %	ε_o , $\cdot 10^{-3}$	ρ , м	σ_1^A , МПа	σ_1^B , МПа	σ^{C1-D1} , МПа	σ^{C-D} , МПа	σ^{C2-D2} , МПа	σ_2^E , МПа	σ_2^F , МПа
1	130	93,0	7,31	595,0	-40,5	-41,9	-43,8	42,7	40,7	-15,7	-13,9
2	120	89,7	7,36	504,2	-33,4	-35,1	-39,1	48,5	46,1	-18,1	-15,9
3	110	86,4	7,40	446,7	-27,3	-29,2	-35,7	52,6	49,9	-19,9	-17,2
4	100	83,0	7,42	406,8	-21,8	-23,9	-33,3	55,5	52,5	-21,2	-18,5
5	90	79,8	7,44	377,5	-17,0	-19,2	-31,7	57,3	54,2	-22,1	-19,2
6	80	76,5	7,44	355,2	-12,5	-14,9	-30,8	58,4	55,0	-22,7	-19,6
7	70	73,2	7,45	338,0	-8,5	-11,0	-30,4	58,7	55,2	-23,0	-19,7
8	60	69,9	7,45	324,3	-4,8	-7,4	-30,4	58,5	54,9	-22,9	-19,5
9	50	66,6	7,44	313,6	-1,5	-4,2	-30,8	57,8	54,0	-22,6	-19,1
10	40	63,3	7,43	305,1	1,6	-1,2	-31,6	56,7	52,8	-22,0	-18,4
11	30	60	7,42	298,5	4,3	1,5	-32,6	55,3	51,3	-21,2	-17,4
12	20	56,6	7,41	293,6	6,8	3,9	-33,8	53,7	49,6	-20,1	-16,3
13	10	53,3	7,39	290,1	9,1	6,2	-35,2	51,8	47,7	-18,7	-14,9
14	0	50	7,37	287,9	11,0	8,1	-36,7	49,8	45,6	-17,1	-13,3
15	-10	46,7	7,35	286,9	12,8	9,5	-38,4	47,6	43,4	-15,3	-11,0
16	-20	43,4	7,34	287,1	14,3	11,1	-39,9	45,5	41,4	-13,2	-8,9
17	-30	40	7,32	286,5	15,7	12,4	-41,5	43,5	39,4	-10,8	-6,5
18	-40	36,7	7,3	291,1	16,8	13,6	-43,0	41,6	37,5	-8,1	-3,9

Здесь коэффициент заполнения внутреннего пространства трубы K , %: $K = 100 \cdot (y_o + R_{вн}) / D_{вн}$.

Таблица 4. Результаты расчета напряжений в поперечном сечении

Номер КЭ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\sigma_{от}$, МПа	1,9	1,8	1,5	1,2	0,7	0,4	0,8	1,2	1,4	1,5	1,5	1,4	1,2	0,8	0,4	0,7	1,2	1,5	1,8	1,9

Таблица 5. Результаты расчета эквивалентных напряжений

№	y_o , мм	$\sigma_{экв}^A$, МПа	$\sigma_{экв}^B$, МПа	$\sigma_{экв}^{C1}$, МПа	$\sigma_{экв}^{D1}$, МПа	$\sigma_{экв}^C$, МПа	$\sigma_{экв}^D$, МПа	$\sigma_{экв}^{C2}$, МПа	$\sigma_{экв}^{D2}$, МПа	$\sigma_{экв}^E$, МПа	$\sigma_{экв}^F$, МПа
1	130	43,3	41,1	47,7	42,3	35,9	56,7	34,2	54,8	31,2	21,7
2	120	36,2	34,4	43,0	37,7	41,1	62,1	39,0	59,9	33,3	22,2
3	110	30,1	28,6	39,7	34,3	45,0	66,0	42,5	63,5	34,9	22,6
4	100	24,7	23,5	37,3	32,0	47,6	68,8	44,9	66,0	36,1	23,0
5	90	19,8	19,0	35,7	30,4	49,4	70,6	46,4	67,5	36,9	23,3
6	80	15,3	15,0	34,7	29,5	50,4	71,6	47,2	68,3	37,4	23,5
7	70	11,3	11,6	34,3	29,1	50,7	71,9	47,4	68,5	37,7	23,5
8	60	7,7	8,8	34,4	29,1	50,5	71,7	47,1	68,2	37,6	23,4
9	50	4,4	6,9	34,8	29,5	49,9	71,0	46,3	67,4	37,3	23,2
10	40	1,5	6,2	35,6	30,3	48,8	70,0	45,2	66,3	36,8	23,0
11	30	1,7	6,8	36,6	31,3	47,5	68,6	43,8	64,8	36,0	22,6
12	20	4,1	8,1	37,8	32,5	46,0	67,1	42,2	63,2	35,0	22,3
13	10	6,3	9,7	39,2	33,8	44,2	65,3	40,5	61,4	33,8	21,9
14	0	8,3	11,2	40,7	35,3	42,3	63,3	38,6	59,4	32,5	21,6
15	-10	10,0	12,4	42,3	37,0	40,4	61,3	36,6	57,4	30,8	21,3
16	-20	11,6	13,8	43,9	38,5	38,5	59,3	34,8	55,5	29,0	21,2
17	-30	12,9	15,0	45,5	40,1	36,7	57,5	33,0	53,6	27,0	21,5
18	-40	14,0	16,1	46,9	41,5	35,0	55,7	31,4	51,9	24,8	22,0

лентных напряжений предельных допустимых значений и где будет происходить повреждение.

Как пример проводится определение эквивалентных напряжений расчетной точки B для случая $y_o = 0$.

Допускаемое напряжение материала при 615 °С [7]: $[\sigma]^B = 35,5$ МПа.

Напряжение, действующее в поперечном сечении трубы:

$$\sigma_1 = \sigma_1^B + \sigma_n + \sigma_1^T = 8,1 + 0,8 + 4,1 = 13,0 \text{ МПа.}$$

Окружное напряжение в продольном сечении трубы определяется по формуле:
 $\sigma_2 = \sigma_{0I} + \sigma_T = 3,2 + 4,1 = 7,3 \text{ МПа}$.

Напряжение в радиальном направлении:
 $\sigma_3 = P = 0,1 \text{ МПа}$.

Эквивалентное напряжение по 4-й теории прочности:

$$\sigma_3 = \sqrt{0,5((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2)} = \\ = \sqrt{0,5((13,0 - 7,3)^2 + (13,0 - 0,1)^2 + (7,3 - 0,1)^2)} = \\ = 11,2 \text{ МПа}.$$

Здесь $\sigma_3 < [\sigma] = [\sigma]^B$, $11,2 < 35,5 \text{ МПа}$, условие прочности выполняется.

Обсуждение результатов расчетного исследования

Максимальный изгиб трубы достигается при падении уровня жидкости в трубе до $K = 45 \%$. Для верхней части в областях, примыкающих к линии раздела фаз, напряжения сжатия достигают предельных значений, (см. в таблице 5 столбцы для т. $C'I$ и $D'I$). Образование таких областей происходит при любом рассмотренном уровне высоты жидкости (см. в таблице 5 столбец для расчетной точки $C'I$). Область образования повреждений имеет некоторую высоту L (см. рисунок 10). Размер данной области увеличивается с падением уровня жидкости. Согласно расчетам, высота данной области L увеличивается до 30 мм при уровне $K = 50 \%$ по высоте.

Вследствие высоких напряжений сжатия в этих областях будет происходить растрескивание основного металла в продольном направлении с возникновением повреждения вида «сетка криппа», пример его показан на рисунке 10. При падении уровня жидкости ниже $K = 50 \%$ условия прочности не выполнены и на внутренней поверхности. В результате будет происходить сквозное растрескивание. Именно так произошел отказ змеевика.

Наличие зоны повреждения для случая высоких уровней жидкости (более $K = 90 \%$, см. таблицы 3, 5) может рассматриваться как условное, поскольку перепад температур между нижней и верхней частями трубы в этом случае значительно уменьшится.

Для нижней части трубы действуют напряжения растяжения. При этом внутренний изгибающий момент создает напряжения сжатия. Напряжения сжатия от его действия возрастают от 0 (сечение $C-D$) до максимального значения для т. E . Зоны высоких напряжений располагаются с внутренней стороны труб в областях, непосредственно примыкающих к линии раздела фаз, где воздействие момента минимально. При изменении уровня жидкости в трубах там будет происходить повреждение в виде продольного растрескивания кольцевых сварных соединений изнутри, зоны повреждения будут располагаться в верхней половине трубы при уровне заполнения от

Рисунок 10. Повреждение труб змеевиков в виде «сетка криппа»: расположение областей повреждений (а); пример повреждения трубы (б)

$K = 60\%$ до 80% по высоте (см. в таблице 5 столбец $\sigma_{\text{экв}}^D$). Результаты обследования подтверждают такой вывод. Это вызвано тем, что в растрескивании важную роль играют температурные напряжения. Развитие растрескивания затрудняется, поскольку они уменьшаются с глубиной, а с середины толщины стенки меняют знак и ему препятствуют.

Выводы

Предложен механизм повреждения, поставлена и решена задача напряженно-деформированного состояния металла при возникновении дополнительных нагрузок вследствие образования перепада температур из-за явления фазового расслоения продукта в горизонтальных трубах.

Расчетное исследование указывает на виды и места повреждений труб, обусловленные явлением фазового расслоения нагреваемого продукта, результаты исследования подтверждаются данными эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бадьин Ю.А., Решетов В.Ф. Влияние фазовой неоднородности нагреваемого сырья на эффективность трубчатых печей // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 1 (154). С. 89-93.
2. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: В 2 Ч. Теоретические основы процессов химической технологии. М.: Химия, 2002. Часть 1. 399 с.
3. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М.: Mashgiz, 1962. 455 с.
4. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика. М.: Лань, 2010. 657 с.
5. Дьяков И.Ф., Чернов С.А., Черный Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах стержневых систем. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2010. 133 с.
6. Колосков М.М., Долбенко Е.Т., Каширский Ю.В. Марочник сталей и сплавов / Под ред. А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2001. 672 с.
7. РТМ 26-02-67-84. Руководящий технический материал. Методика расчета на прочность элементов печей, работающих под давлением. М.: Союзнефтехиммаш, 1984. 17 с.
8. Трубчатые печи: Каталог. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1998. 40 с.
9. Вихман Г.Л., Круглов С.А. Основы конструирования аппаратов и машин нефтеперерабатывающих заводов. М.: Машиностроение, 1978. 328 с.

REFERENCES

1. Badin Yu.A., Reshetov V.F. Vliyanie fazovoi neodnorodnosti nagrevaemogo syr'ya na effektivnost' trubchatykh pechei [Influences of phase Inhomogeneity of Heated Products on Efficiency for Tube Fired Heaters]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo*

universiteta — *Izvestia VSTU*, 2015, No. 1 (154), pp. 89-93. [in Russian].

2. Dytnerskii Yu.I. *Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii: V 2 Ch. Teoreticheskie osnovy protsessov khimicheskoi tekhnologii* [Processes and Devices of Chemical Technology: In 2 Parts. Theoretical Foundations of Chemical Technology Processes]. Moscow, Khimiya Publ., 2002, Part 1. 399 p. [in Russian].

3. Andreeva L.E. *Uprugie elementy priborov* [Elastic Elements of Devices]. Moscow, Mashgiz Publ., 1962. 455 p. [in Russian].

4. Darkov A.V., Shaposhnikov N.N. *Stroitel'naya mekhanika* [Structural Mechanics]. Moscow, Lan' Publ., 2010. 657 p. [in Russian].

5. D'yakov I.F., Chernov S.A., Chernyi N.N. *Metod konechnykh elementov v raschetakh stержnevyykh sistem* [Finite Element Method in the Analysis of Bar Systems]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2010. 133 p. [in Russian].

6. Koloskov M.M., Dolbenko E.T., Kashirskii Yu.V. *Marochnik staley i spлавov* [Brand of Steels and Alloys]. Ed. by A.S. Zubchenko. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 672 p. [in Russian].

7. РТМ 26-02-67-84. *Rukovodyashchii tekhnicheskii material. Metodika rascheta na prochnost' elementov pechei, rabotayushchikh pod davleniem* [RTM 26-02-67-84. Guiding Technical Material. Method for Calculating the Strength of Elements of Furnaces Operating Under Pressure]. Moscow, Soyuzneftekhimmash Publ., 1984. 17 p. [in Russian].

8. *Trubchatye pechi: Katalog* [Tube Furnaces: Catalog]. Moscow, TsINTIkhimneftemash Publ., 1998. 40 p. [in Russian].

9. Vikhman G.L., Kruglov S.A. *Osnovy konstruirovaniya apparatov i mashin neftepererabatyvayushchikh zavodov* [Fundamentals of Designing Apparatus and Machines for Oil Refineries]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 328 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ ABOUT THE AUTHOR

Бадьин Юрий Аркадьевич, старший научный сотрудник лаборатории № 2, АО «ВНИКТИ нефтехимоборудование», г. Волгоград, Российская Федерация

Yurii A. Badin, Senior Researcher of Laboratory No. 2, JSC «VNIKTI neftekhimoborudovanie», Volgograd, Russian Federation

e-mail: BadinYuA@vniktinho.ru