

*А.Г. Чиркова, Н.А. Махутов, А.В. Рубцов, Е.А. Наумкин,
А.Н. Иванова, И.Р. Кузеев., Акомолафе Байоде Андрию*

РАЗРУШАЮЩЕЕ ИСПЫТАНИЕ ТРУБ ЗМЕЕВИКОВ РЕАКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ

Углубление переработки нефти требует совершенствования работы реакционных печей для высокотемпературного разложения различных углеводородов и их композиций. Сложное термосиловое нагружение и активное воздействие среды на металл приводит к существенному снижению долговечности змеевиков реакционных печей. При этом наблюдается образование различных дефектов, основными из которых являются продольные и поперечные трещины в основном металле и сварных соединениях, потеря устойчивости формы, интенсивный износ толщины стенки. Как правило, наличие этих дефектов является основной причиной частых остановок печей на ремонт и повышения себестоимости изготавливаемой продукции.

Возникновение большого числа разнообразных дефектов указывает на то, что реализуются несколько механизмов накопления повреждений в металле труб. В работах Чирковой А.Г., Кинева С.А., Симарчук А.С., Хаерланамовой Е.А., Авдеевой Л.Г. [1-4] представлены результаты анализа влияния различных факторов на формирование и изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) змеевиков как цельных конструкций, даны характеристики отдельных дефектов, показано изменение механических свойств высоколегированных сталей в процессе эксплуатации, изучено НДС в ремонтных сварных соединениях, отли-

чающихся разнотолщинностью, в условиях различных стадий технологического процесса. Однако в настоящее время не сформулированы основные механизмы накопления повреждений в металле труб и возникновения дефектов нарушения сплошности, что делает настоящую работу актуальной.

Вместе с тем данные работы [5] показывают, что в мировой практике эта проблема также не решена, поскольку более 70% реакционных печей имеют межремонтный пробег, не превышающий 60 суток при разложении газового сырья, и 60% печей имеют пробег не более 40 суток при разложении жидкого сырья. Аналогичная картина имеет место и на отечественных заводах.

Во время ремонтных работ были отобраны образцы дефектных труб из высоколегированной стали 10X23H18. Разрушению подвергли три трубы с различными уровнями накопленных повреждений и сроками эксплуатации:

- труба № 7 с дефектом в виде отдушины с вероятной наработкой немногим более 3000 часов
- труба № 6 с трещиноподобными дефектами и многочисленными отдулинами;
- труба № 3 – с дефектом искривления формы в виде изгиба образующей и с искусственно нанесенными трещиноподобными дефектами в виде продольного и поперечного надпила с внутренней и внеш-

Остаточный ресурс нефтегазового оборудования

ней стороны трубы. Трубы под №6 и №3 имеют наработку в пределах 5000 – 6000 часов (более точное определение наработки не представляется возможным). На рисунках 1-3 представлены чертежи и фотографии труб, приготовленных для испытания.

Ниже приведены фотографии дефектных мест испытанных фрагментов труб (рисунок 4). Из фотографий видно, что наблюдается существенное искажение геометрии, причем на двух трубах искажения характеризуются локальными вздутиями (рисунки 1 и 2), а на третьей трубе имеет место изгиб образующей.

Перед началом эксперимента для всех трех труб произвели замеры толщины стенки по длине трубы с шагом 50 мм ультразвуковым толщиномером ТУЗ-2.

Параллельно с измерением толщины стенки в этих же точках измеряли другие параметры, в том числе твердость ультразвуковым измерителем твердости УЗИТ-3.

Предварительно печные трубы были подвергнуты визуальному осмотру с внутренней и наружной стороны. При этом обнаружено неравномерно распределенное по внутренней поверхности чешуйчатое отслоение металла.

Были проведены предварительные исследования, которые заключались в разметке труб на зоны замеров и измерении толщин стенки печных труб, а также их твердости с шагом замеров в 50 мм. Измерения показали (рис.5), что толщина стенки претерпела существенные изменения по сравнению с первоначальной величиной ($S_{ном} = 7$ мм). Показатель $S = S_{ном}/S_i$ достигает значения 1,33, а в области локального изменения формы 1,56.

Также наблюдается большой разброс значений твердости конструкционного материала: отношение максимальных и минимальных значений достигает величины 3,24. Это означает, что распределение механических характеристик материала в оболочке обладает существенной неоднородностью. В то же время неоднородность поля напряжений также предопределено в связи с неоднородным распределением значений толщины стенки.

При проведении предварительных исследований для измерения магнитных характеристик использовали магнитоизмерительный феррозондовый прибор Ф-205.30А, который предназначен для обнаружения дефектов в намагниченных ферромагнитных деталях, в том числе в сварных конструкциях, а также измерения составляющих напряженности постоянного магнитного поля (H_n, H_t) и градиента напряженности постоянного магнитного поля (G) на поверхностях деталей и в свободном пространстве.

После освобождения от воздуха, в сосуд постепенно нагнетается давление. При постоянном давлении $P=1$ МПа были сделаны замеры всех составляющих напряженности постоянного магнитного поля. Также замеры были сделаны при постоянном давлении $P=2$ МПа. Достаточно информативную картину дает изменение нормальной составляющей напряженности постоянного магнитного поля. Характерные графики магнитных измерений приведены на рисунках 6-8.

Остаточный ресурс нефтегазового оборудования

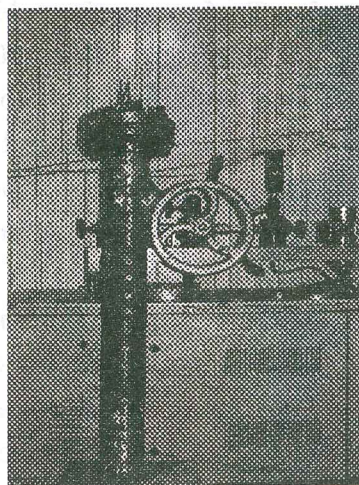
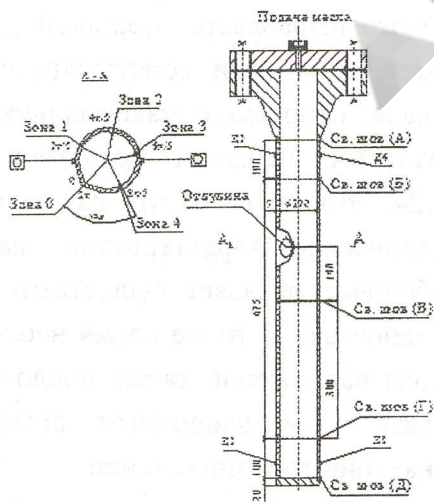


Рисунок 1 - Чертеж и фотография трубы № 7, приготовленной для испытания

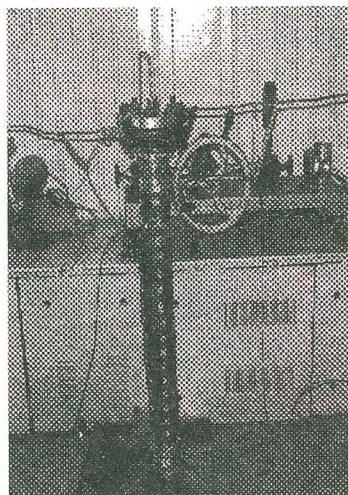
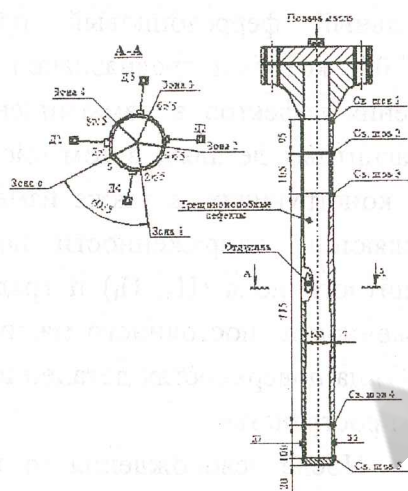


Рисунок 2 - Чертеж и фотография трубы № 6, приготовленной для испытания

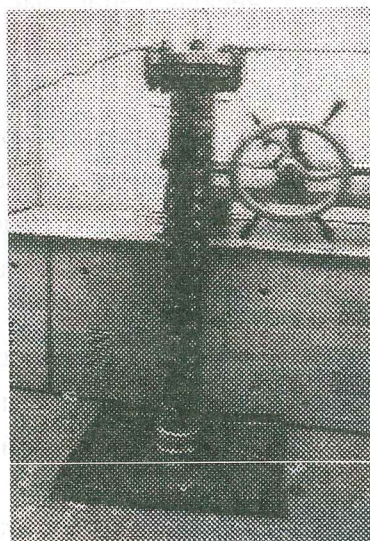
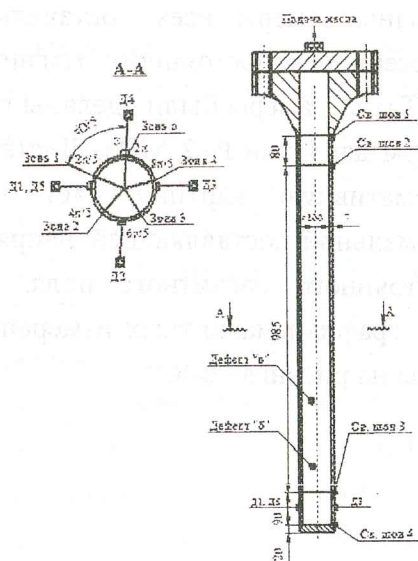


Рисунок 3 - Чертеж и фотография трубы № 3 ($\tau=5253$ ч)

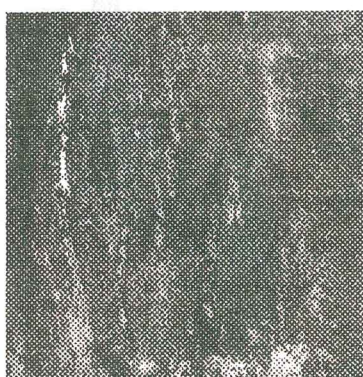
Остаточный ресурс нефтегазового оборудования



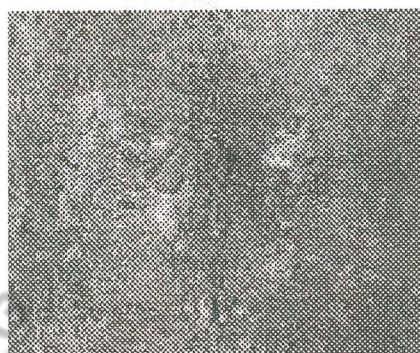
а)



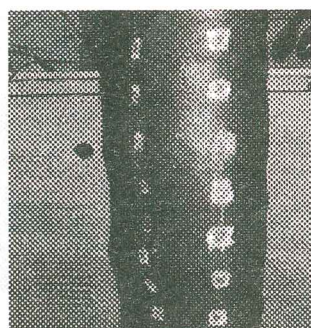
б)



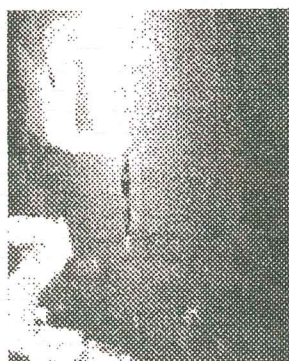
в)



г)



д)



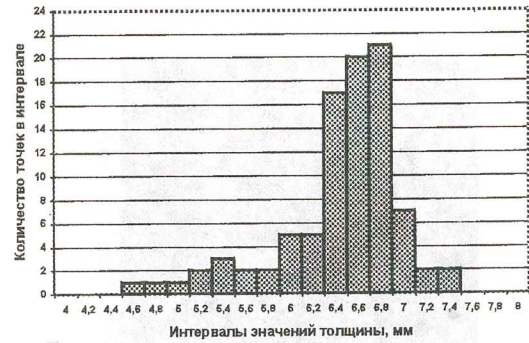
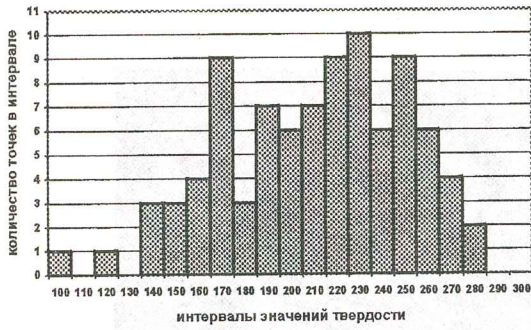
е)

Рисунок 4 - Дефекты печных труб, присутствующие до проведения разрушения:
а, б – отдулина на трубе № 7; в, г – трещиноподобные дефекты на трубе № 6;
д – отдулины на трубе № 6; е – искусственный надпил на трубе № 3

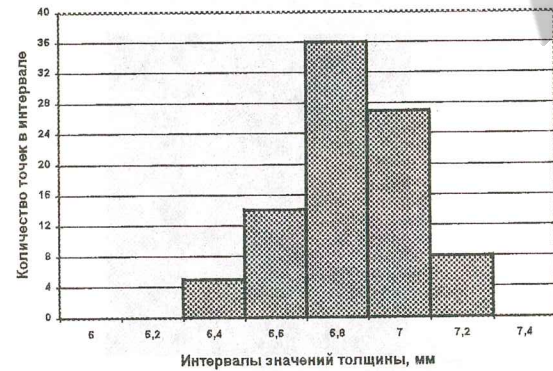
Остаточный ресурс нефтегазового оборудования



а)



б)

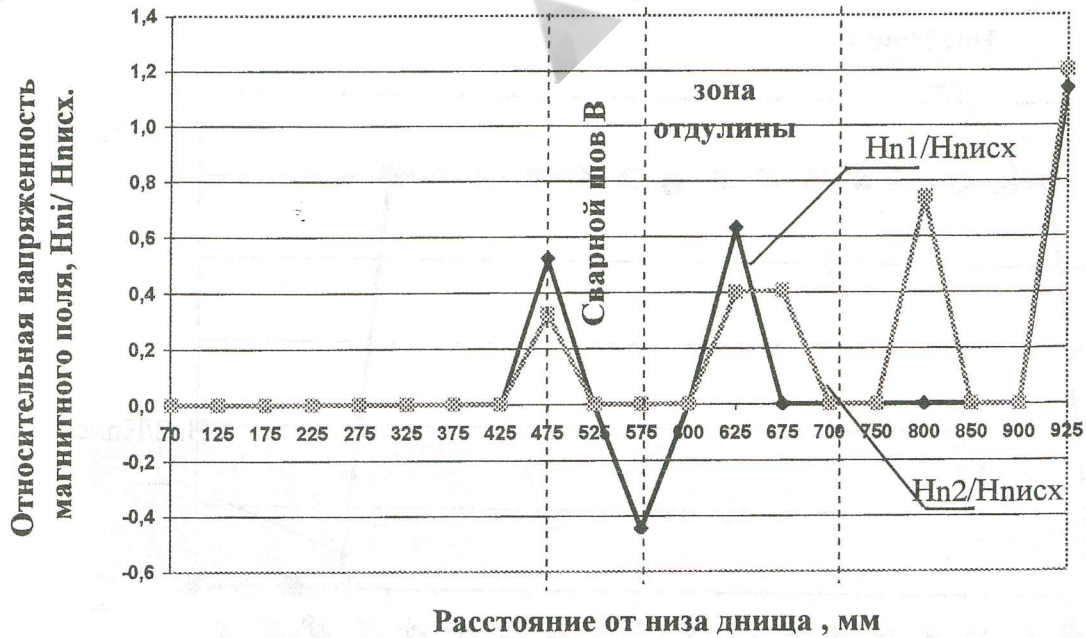


в)

Рисунок 5 – Разбросы значений толщин стенок и твердости по трубам:

а)-труба № 7, б)-труба № 6, в) труба № 3

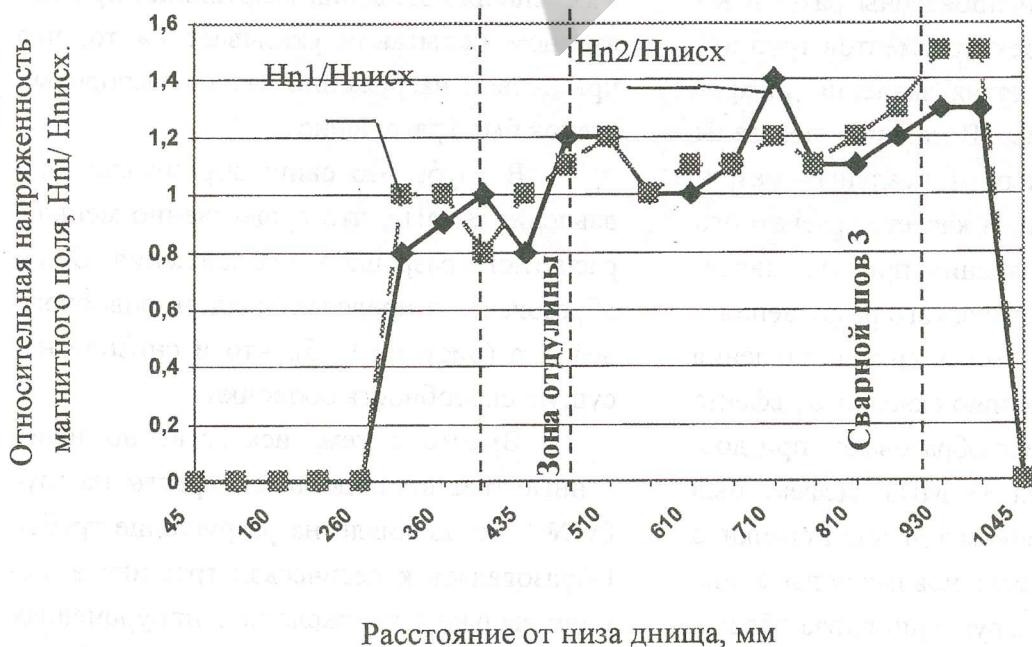
Остаточный ресурс нефтегазового оборудования



$H_{n1}/H_{nисх}$ – отношение относительной напряженности магнитного поля при $P_{исп}=1$ МПа к $P=0$ МПа

$H_{n2}/H_{nисх}$ – отношение относительной напряженности магнитного поля при $P_{исп}=2$ МПа к $P=0$ МПа

Рисунок 6 - Распределение относительной напряженности нормальной составляющей постоянного магнитного поля в зоне 0 трубы № 7

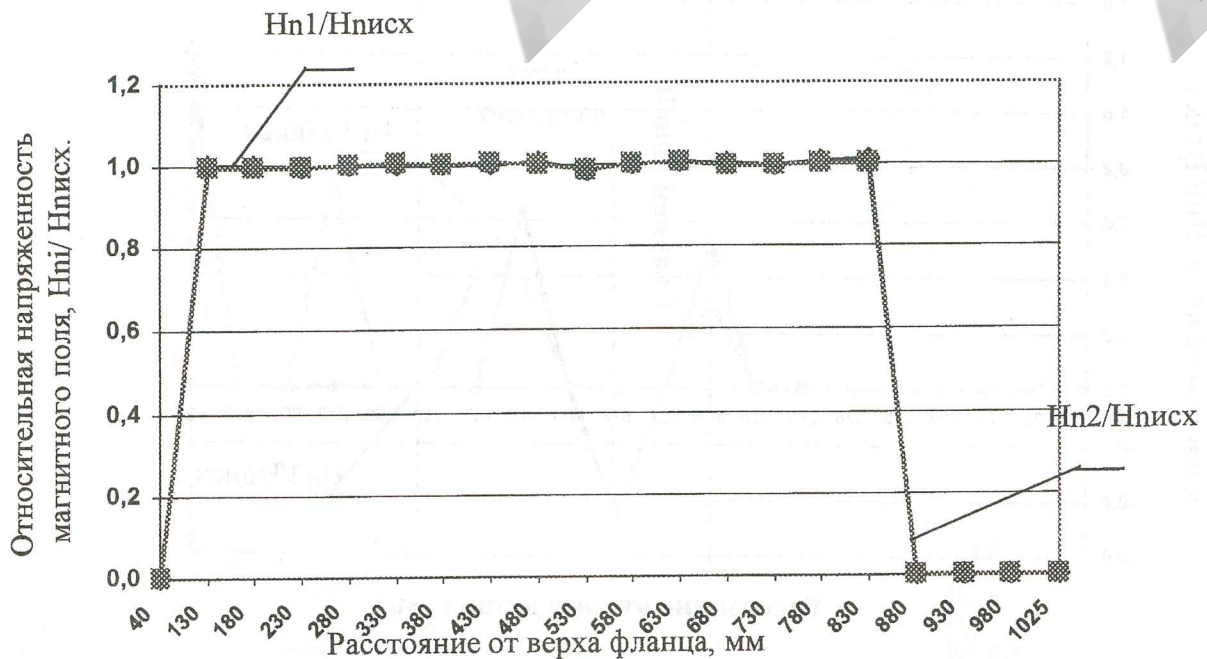


$H_{n1}/H_{nисх}$ – отношение относительной напряженности магнитного поля при $P_{исп}=1$ МПа к $P=0$ МПа

$H_{n2}/H_{nисх}$ – отношение относительной напряженности магнитного поля при $P_{исп}=2$ МПа к $P=0$ МПа

Рисунок 7- Распределение относительной напряженности нормальной составляющей постоянного магнитного поля в зоне 0 трубы №6

Остаточный ресурс нефтегазового оборудования



$H_{n1}/H_{nисх}$ — отношение относительной напряженности магнитного поля при $P_{исп}=1$ МПа к $P=0$ МПа

$H_{n2}/H_{nисх}$ — отношение относительной напряженности магнитного поля при $P_{исп}=2$ МПа к $P=0$ МПа

Рисунок 8 - Распределение относительной напряженности нормальной составляющей постоянного магнитного поля в зоне 2 трубы №3

Далее были проведены разрушающие испытания трех фрагментов труб путем плавного поднятия давления до критического значения. В таблице показаны значения расчетных и реальных разрушающих давлений. В качестве расчетного разрушающего давления приняты значения давления пластического разрушения.

Для трубы №6 поднятие давления привело к образованию сквозного дефекта типа свища. Дефект образовался при достижении давления 33 МПа. Дефект был закрыт с применением точечной сварки, а оболочка подверглась новому испытанию. При повторном нагружении снова образовался свищ в той же зоне трубы, что и первый. Однако свищ образовался при существенно меньшем давлении в 22 МПа. Предполагается, что свищи образовались за счет слияния пор, которые возникли в процессе реализации ползучести.

Уменьшение давления разрушения при повторном испытании указывает на то, что при первом нагружении часть межпоровых стенок было разрушено.

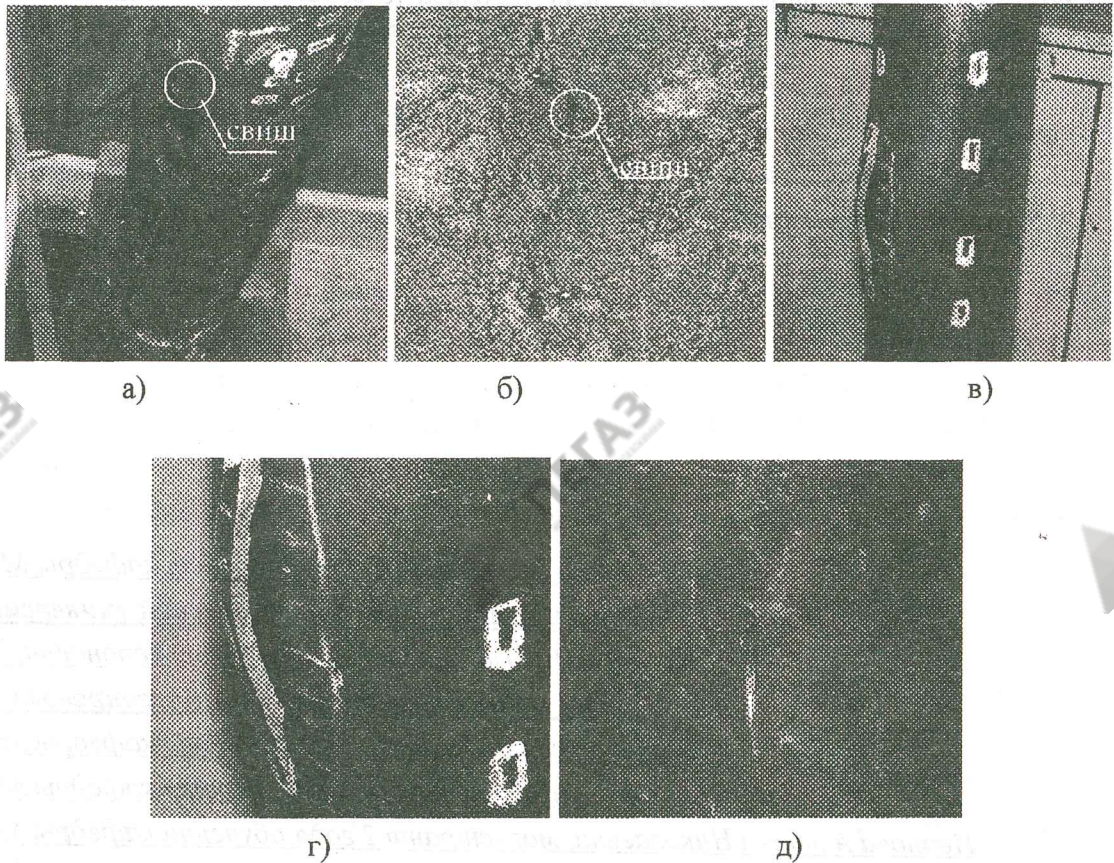
В трубе №6 свищ образовался при давлении 8 МПа, что существенно меньше расчетного разрушающего давления. Свищ образовался в пределах трещиноподобного дефекта (рисунок 9, б), что и снизило несущую способность оболочки.

Вместе с тем, искусственно нанесенные трещиноподобные дефекты на трубу №3, не повлияли на разрушение трубы. Образовалась классическая трещина в меридиональном направлении, приуроченная к максимальному прогибу трубы образованному в процессе эксплуатации. Механизмы образования трещин будут продолжены при металлографических исследованиях.

Остаточный ресурс нефтегазового оборудования

Таблица 1 - Разрушающие давления при испытаниях труб

№ трубы	Расчетное давление пластического разрушения, МПа	Разрушающее давление, при котором образовался дефект
7	36,4	1 свищ - 33 МПа 2 свищ - 22 МПа
6	29,4	Образование свища в существующем дефекте при 8 МПа
3	37,8	Образовалась трещина при давлении 37 МПа



а) свищ на трубе № 7; б) свищ на трубе № 6;
в, г) трещина на трубе № 3; д) увеличение ширины надтила на трубе № 3
Рисунок 9 - Образовавшиеся дефекты в процессе разрушения труб

Образовавшийся свищ на трубе № 6 позволил провести измерения, необходимые для определения его диаметра по скорости истечения масла из оболочки. Расчетный диаметр свища составил величину 0,173 мм.

Предварительный анализ результатов разрушительных испытаний фрагмен-

тов труб змеевиков реакционной печи позволил получить сведения о характере накопления повреждений и образования дефектов разрыва сплошности, которые будут использованы при разработке методики определения ресурса змеевиков.

Остаточный ресурс нефтегазового оборудования

Список литературы

1. Чиркова А.Г., Авдеева Л.Г., Ситарчук А.С. Фрактальный анализ эволюции адаптации структуры стали 20Х23Н18 к условиям эксплуатации в печах пиролиза углеводородов.-СПб.: Недра, 2004.-88 с.
2. Чиркова А.Г., Ситарчук А.С., Кинев С.А. Определение напряженно-деформированного состояния сварных соединений. Всероссийский научный журнал – Механика композиционных материалов и конструкций Т.9.- № 2.- 2003.- С.250-255.
3. Чиркова А.Г., Хаерланамова Е.А., Кузеев И.Р. Образование квазимногослойных оболочек при эксплуатации труб змеевика печи пиролиза углеводородов.- Механика композиционных материалов и конструкций, том 10, №2, 2004. С. 153-156.
4. Чиркова А.Г. Механизмы адаптации к внешним нагрузкам стали 20Х23Н18 в трубах печей пиролиза.- Заводская лаборатория, №11, том 70, 2004, с.37-42.
5. Высекерски А.Г., Фишер Г., Шилмоллер К.М. Уменьшение коксообразования в трубах печей олефиновых установок // Нефтегазовые технологии.- 1999, №3.- С. 82-84.

Чиркова Алена Геннадиевна, к.т.н., доцент кафедры МАХП
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Махутов Николай Андреевич, член-корреспондент РАН,
Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН
Рубцов Алексей Вячеславович, ассистент кафедры МАХП
Наумкин Евгений Анатольевич к.т.н., доцент кафедры МАХП
Иванова Альбина Николаевна, магистрант 2 года обучения кафедры МАХП
Акомолафе Байоде Андрию, магистрант 1 года обучения кафедры МАХП
Уфимский государственный нефтяной технический университет