

**КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ  
ОБОЛОЧКОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ,  
БЫВШЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ,  
ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ**

Чиркова А.Г., Рубцов А.В., Наумкин Е.А., Гайдукевич У.П.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет*

*Исследования посвящены оценке предельного состояния труб змеевиков реакционных печей. Изучение змеевиков показало возникновение различных дефектов связанных с пластическим деформированием, потерей устойчивости формы и появлением трещин. Фрагмент трубы реального змеевика с деформированным участком использован для создания оболочковой конструкции, испытанной на специальном стенде на действие внутреннего давления. При этом контролировалось изменение магнитных и акустических характеристик конструкционного материала. Получены оригинальные результаты комплексных исследований поведения оболочковой конструкции при деформировании внутренним давлением.*

**Постановка задачи**

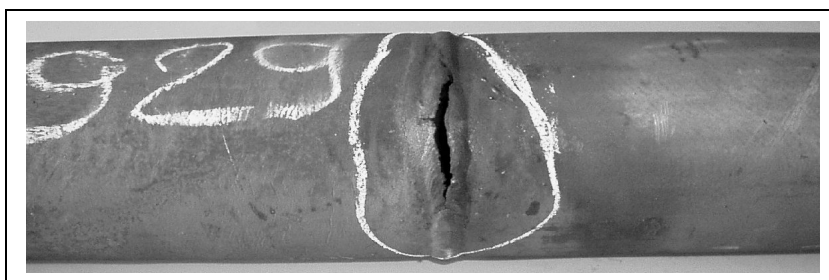
В процессе эксплуатации реакционных змеевиковых печей в трубах возникают разнообразные дефекты: продольные и поперечные трещины, локальная и общая потеря устойчивости формы. На рис. 1 показаны некоторые дефекты.

Для определения механизмов достижения конструкционным материалом предельного состояния и создания системы раннего диагностирования необходимо провести исследования с использованием фрагментов труб змеевиков реакционных печей, которые позволят выявить закономерности изменения реакции объекта на внешнее воздействие. С этой целью во время проведения ремонтных работ были отобраны фрагменты труб с различными дефектами. Один из фрагментов, который содержал локальный дефект изменения формы, использовали для нагружения гидростатическим давлением. Трубы изготовлены из высоколегированной аустенитной стали 10X23H18.

Предварительно фрагмент змеевика был подвергнут визуальному осмотру с внутренней и наружной стороны. При этом было отмечено неравномерно распределенное по внутренней поверхности чешуйчатое отслоение металла.

Целью настоящих исследований является доведение до разрушения фрагмента трубы и измерение в процессе нагружения внутренним давлением

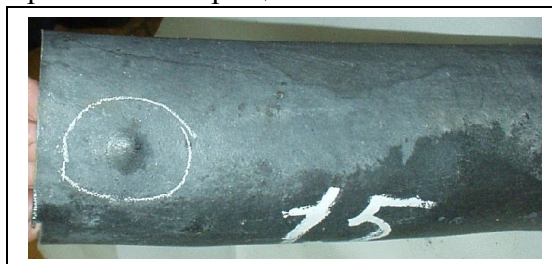
магнитных и акустических характеристик конструкционного материала. Для измерения магнитных характеристик использовали магнитоизмерительный феррозондовый прибор Ф-205.30А предназначен для обнаружения дефектов в намагниченных ферромагнитных деталях, в том числе в сварных конструкциях, а также измерения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



а) фрагмент труб в зоне сварного шва с трещиной.



б) необратимая пластическая деформация формы трубы



в) труба с отдулиной



г) пластически деформированная труба с трещиной в сварном шве



д) пластически деформированная труба с продольной трещиной

Рисунок 1. Дефектные трубы [1]

Реакцию объекта исследований на действие внутреннего давления изучали с помощью метода акустической эмиссии (АЭ). В ходе эксперимента наблюдали за изменениями уровня амплитуд, активности импульсов АЭ сигналов и энергии локаций. Сбор данных акустической эмиссии осуществлялся при помощи 16-канального прибора ЛОКУС 4181 посредством высокочастотных резонансных датчиков, заключенных в магнитные держатели, установленных на волноводах.

### Предварительные исследования

Для реакционных змеевиков такие дефекты являются характерными [2-4]. Все исследователи склоняются к мысли, что два фактора являются основными при формировании дефектов: неравномерное температурное поле с локальными превышениями температур регламентных значений; отложения кокса инициирующие интенсивную диффузию углерода в металл трубы. Эти два фактора взаимосвязаны, так как неравномерное отложение кокса приводит к искажению температурного поля и появлению изгибных напряжений и деформаций, в свою очередь кокс, как хороший изолятор приводит к повышению температуры стенки и увеличению скорости диффузии углерода.

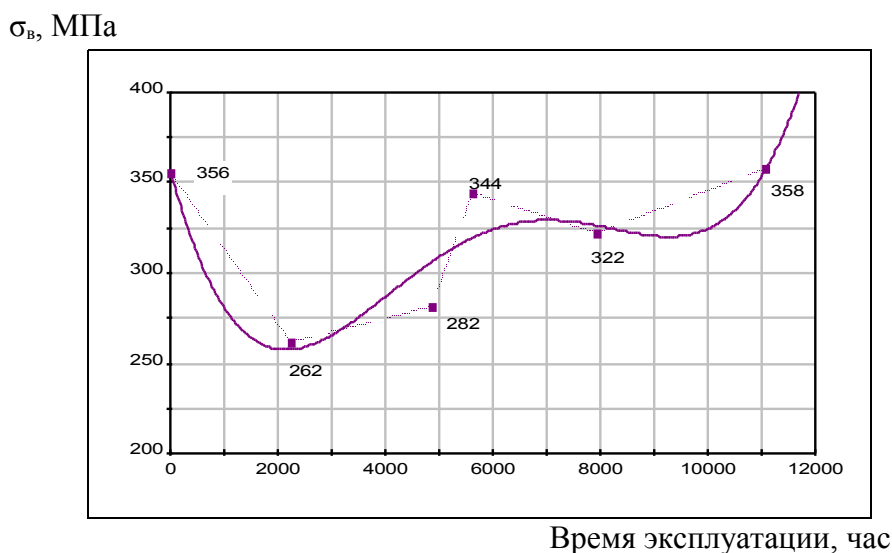


Рисунок 2. Изменение предела прочности стали 20X23H18 в процессе эксплуатации в пиролизной печи

Микроструктурные исследования стали 20Х23Н18, из которой изготовлены печные трубы, показали, что изменение свойств стали в процессе эксплуатации сопровождается эволюцией сигма-фазы [5]. При этом основные механические характеристики изменяются по полиэкстремальным зависимостям от времени эксплуатации.

Существенное снижение предела прочности при определенной наработке увеличивает вероятность возникновения дефектов и требует оценки несущей способности труб. Особый интерес вызывает несущая способность труб с локальной потерей устойчивости формы.

При эксплуатации печных труб происходит их утонение за счет отслоения материала с внутренней поверхности, причем утонение происходит с различной скоростью даже в пределах одной трубы. Поэтому перед началом эксперимента произвели замеры толщины стенки по длине трубы с шагом 50 мм ультразвуковым толщиномером ТУЗ-2, который предназначен для:

- измерения толщины изделий из конструкционных металлических сплавов, в том числе с корродированными поверхностями, при одностороннем доступе к ним;
- измерения скорости распространения ультразвуковых колебаний (УЗК) в металлах при известной толщине.

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

На рис. 3 и 4 показано распределение измерений толщины стенки и твердости. Измерения показали, что толщина стенки претерпела существенные изменения по сравнению с первоначальной величиной ( $S_{\text{ном}} = 7$  мм). Показатель  $S = S_{\text{ном}} \setminus S_i$  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.

### Методика эксперимента

Для проведения лабораторного эксперимента была создана герметичная конструкция, основу которой составляла труба 114×7 из стали 10Х23Н18Т со сроком эксплуатации  $\tau=3022$  ч., сваренная с катушками металла в состоянии поставки для постепенного нагружения внутренним избыточным давлением. На рис. 5 показан чертеж испытываемого сосуда, а на рис. 6 общий вид испытательной установки.

Инструментом разрушения служил, приспособленный для гидравлических испытаний грузопоршневой манометр МП-600, позволяющий плавно нагнетать давление с помощью штурвала. Рабочим органом являлся малопорционный поршневой насос, а индикатором эффективности процесса служил манометр избыточного давления, прошедший государственную поверку. В качестве рабочей среды использовалось автотракторное масло Novoil.

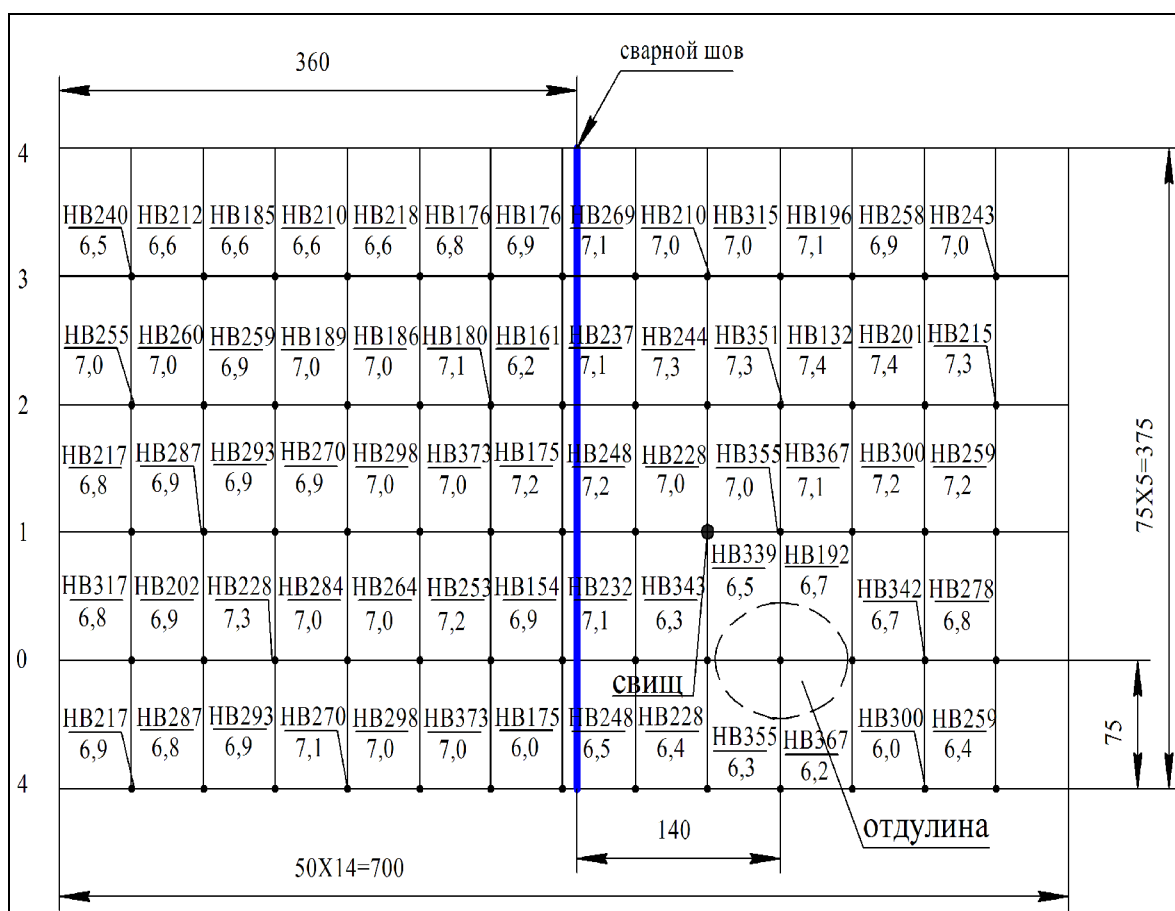


Рисунок 3. Развертка фрагмента трубы с замераами твердости и толщин стенки по зонам 0-4

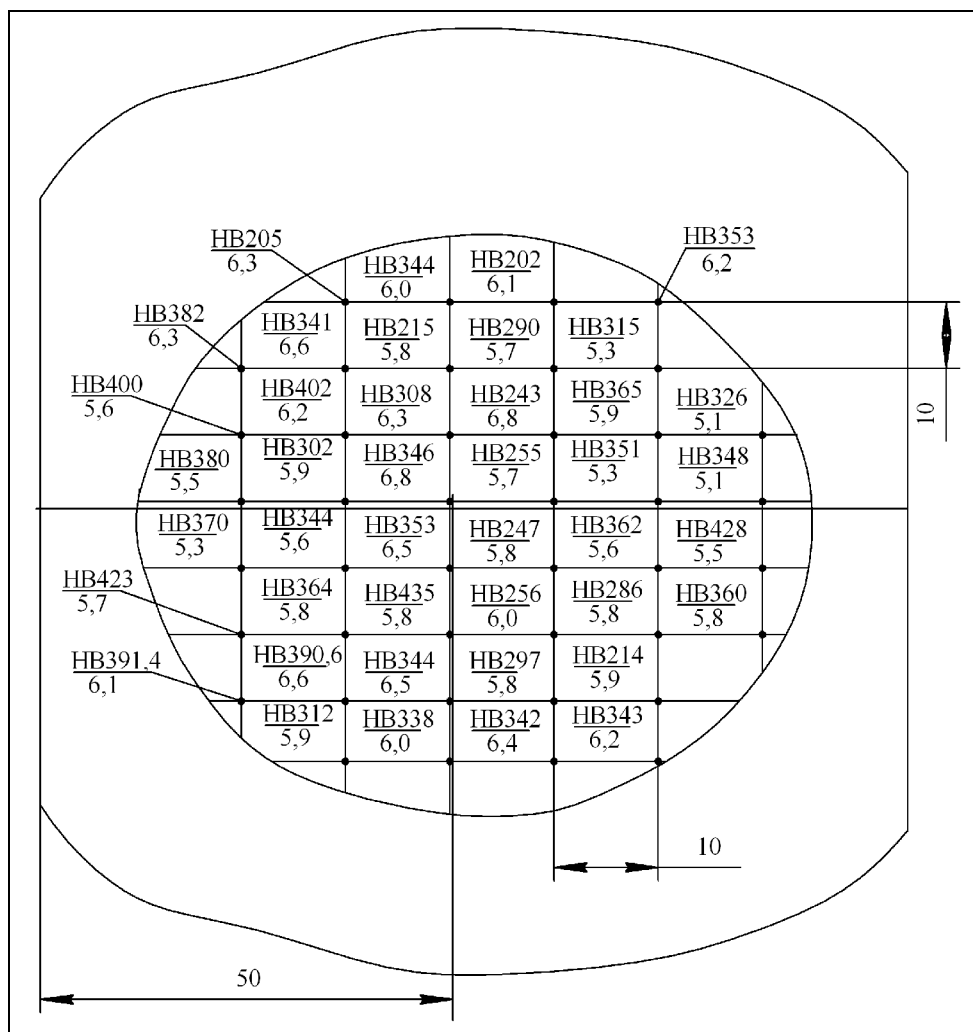


Рисунок 4. Распределение значений толщины стенки и твердости в зоне локальной потери устойчивости формы трубы

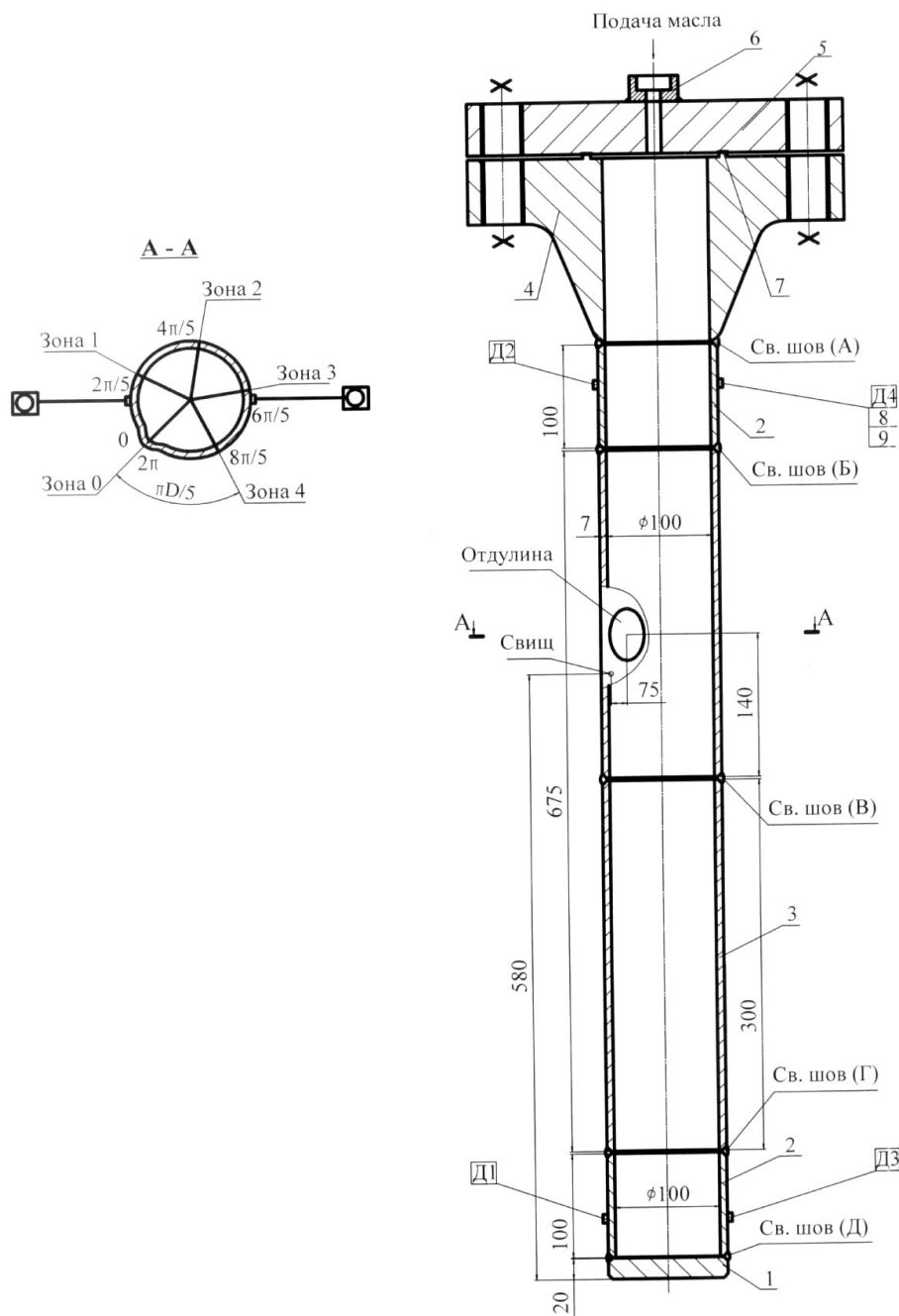


Рисунок 5. Сосуд цилиндрический для испытания внутренним давлением:

- 1 – днище плоское (Сталь 20); 2 – катушка в состоянии поставки (10X23H18T);  
 3 – катушка, вырезанная из змеевика трубчатой печи пиролиза, срок эксплуатации 3022ч.;  
 4 – фланец 100-64 ГОСТ 12832-67 (Сталь 20); 5 – крышка плоская (Сталь 20);  
 6 – бобышка для подачи масла (Сталь 20); 7 – металлическая прокладка;  
 8 – датчики акустической эмиссии, 9 – волноводы.

Сварные швы выполнены ручной электродуговой сваркой  
 электродами ОЗЛ-6, ОЗЛ-9а, ГС-1

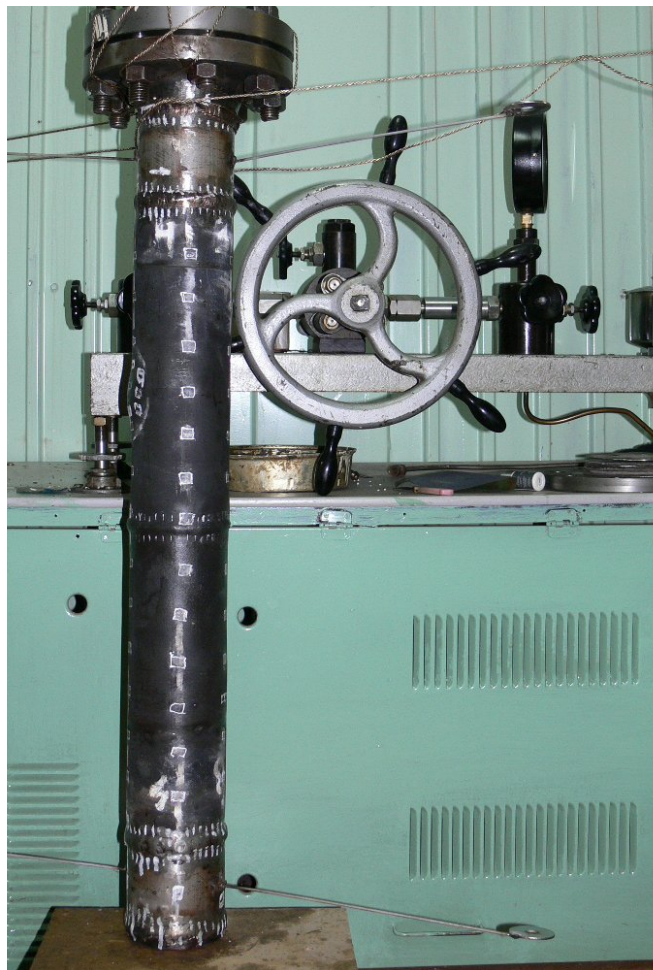


Рисунок 6. Общий вид испытательной установки с сосудом

После опрессовки и освобождения от воздуха, в сосуд постепенно нагнетается давление по схеме, показанной на рис. 7. При постоянном давлении были сделаны замеры всех составляющих напряженности постоянного магнитного поля.

При дальнейшем повышении давления магнитные измерения не проводились, исходя из принципов соблюдения безопасности.

Для проведения акустико-эмиссионного контроля использовали волноводы, изготовленные из нержавеющей стали и пластины из углеродистой стали для крепления датчиков. Необходимость в этом возникла вследствие того, что крепление датчиков непосредственно к образцу невозможно вследствие больших помех магнитных держателей датчиков измерениям феррозондовым прибором.

P, МПа

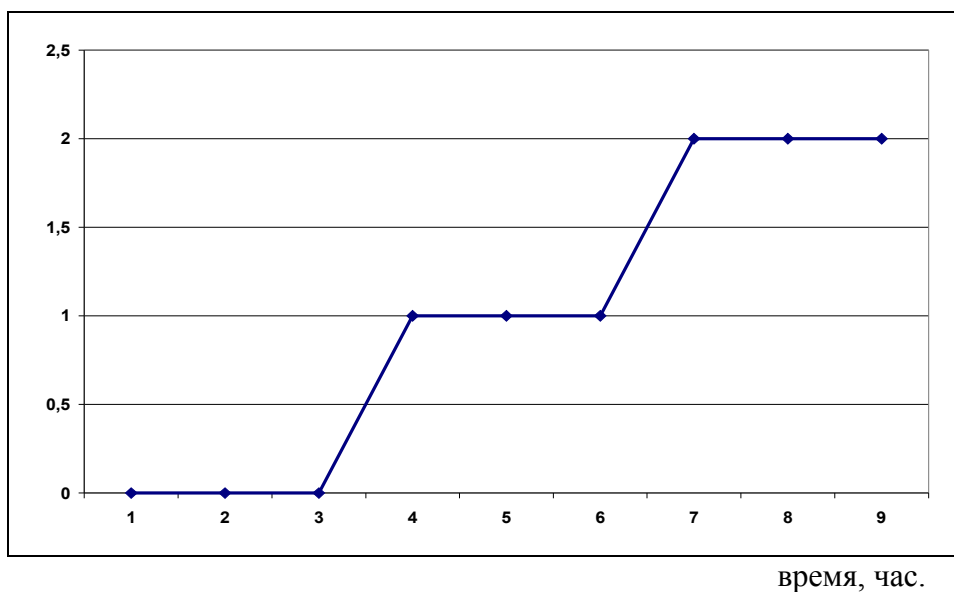


Рисунок 7. Схема подъема давления в сосуде

Нагружение объекта проводилось ступенчато, через 2 МПа давление фиксировалось и на данном давлении проводилась запись АЭ параметров нагружения объекта в течении 3 минут. Запись АЭ параметров проводилась также при нагружении и сбросе давления. Результаты акустико-эмиссионного контроля записывались и затем обрабатывались в специальном программном приложении к акустико-эмиссионному прибору.

Первоначально без давления проводилось тестирование прибора, результаты которого представлены на рис. 8.

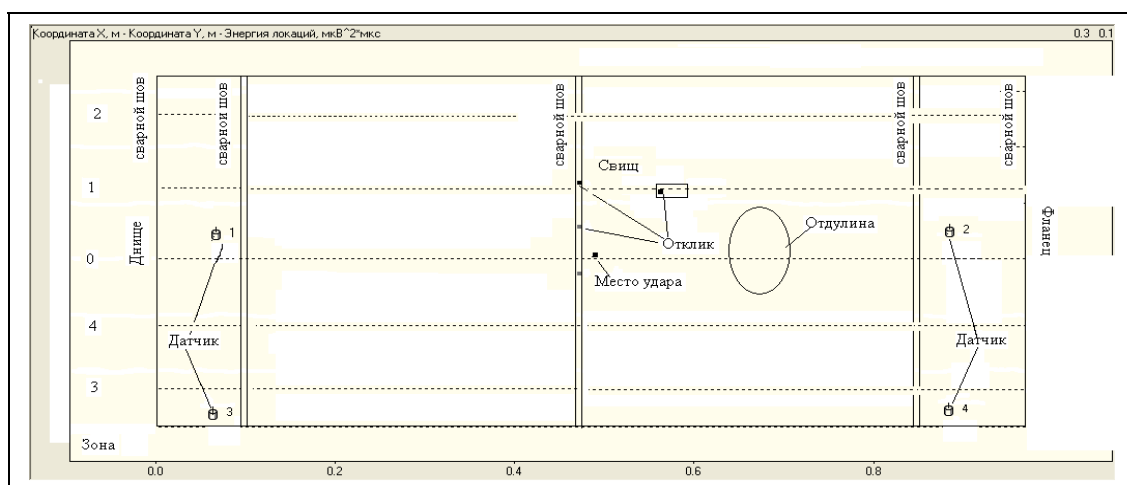


Рисунок 8. Тестирование АЭ прибора

Для имитации сигнала в процессе тестирования прибора разработаны различные источники сигналов – от имитатора Су-Нильсена, в основу которого положен излом грифеля карандаша, до электронных генераторов импульсов сигналов. На практике чаще всего используют точечный удар металлическим предметом (например, отверткой), именно поэтому в данном эксперименте было отдано предпочтение данному методу, хотя он и не является прогрессивным.

В результате тестирования было выявлено, что все датчики реагируют на посланный сигнал, программное обеспечение с заданной точностью определяет место источника звука, кроме того, выявлено явление отклика возможных существующих дефектов на ударное воздействие – отклик наблюдался в зоне среднего сварного шва и в зоне, где в последствии образовался свищ.

### Результаты экспериментов

В ходе эксперимента при помощи акустической эмиссии были выявлены развивающиеся дефекты, которые проявляли себя на разных давлениях. При этом на давлении 33 МПа образовался свищ и продолжение эксперимента стало невозможным.

Наиболее информативная картина распределения АЭ сигналов при давлении 33 МПа в момент образования свища представлена на рис. 9.

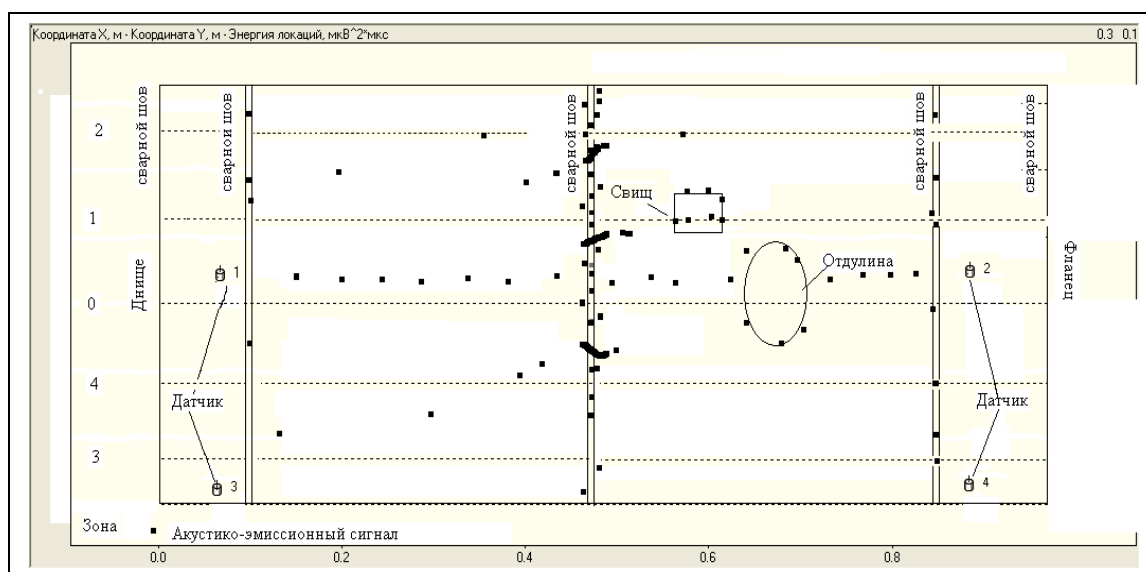


Рисунок 9. Образование свища при достижения давления 33 МПа

В результате анализа распределения АЭ сигналов можно сделать вывод о том, что помимо формирования свища в металле происходят процессы развития опасных дефектов в области среднего сварного шва. При этом общая поврежденность поверхности, расположенной с верхней стороны развертки выше, чем с нижней по отношению к сварному соединению, именно в этой половине образовался свищ и располагается область пластических деформаций. Кроме того, определенным образом проявили себя новые сварные швы приварки к старой трубе новых обечаек. В области срединного сварного шва заметны кластеризующиеся дефекты. Проявление АЭ сигналов в области свища проявляется повторяемостью на различных давлениях, однако энергия и амплитуда этих сигналов не максимальны, за исключением момента образования свища. Максимальные по амплитуде и энергии сигналы «путешествуют» по поверхности образца. Следует отметить, что существенное влияние на анализ акустико-эмиссионных сигналов оказывает обработка АЭ сигналов, а именно выставляемые в процессе обработки фильтры сигналов и тип антенны (линейная, поверхность цилиндра или развертка цилиндра), а также скорость распространения ультразвуковой волны. В данном случае использовались все виды обработки, в результате чего удалось сформировать обобщающую картину, представленную на рисунке 9.

Существенным недостатком данного метода является то, что любую внешнюю помеху АЭ определяет как локацию и возможный дефект. Поэтому данный метод нуждается в подтверждении дополнительными методами неразрушающего контроля.

Измерения феррозондовым прибором магнитных характеристик металла оказались весьма информативными. Предварительные исследования процесса разрушения сталей феррозондовым методом [6], показали, что уже на ранних стадиях накопления повреждений по распределению относительной величины напряженности магнитного поля с большой достоверностью можно определить локализацию очага будущего разрушения. Причем это проявляется при разрушении стержней, пластин и оболочек.

Для более сложной системы, каковой является составной цилиндр, подвергнутый испытанию, распределение изменений магнитных характеристик

имеет несколько экстремумов, как это показано на рис. 10. Поскольку образование свища при достижении давления 33 МПа не позволило довести оболочку до разрушения с образованием трещины, то появление нескольких экстремумов на зависимости магнитных характеристик по поверхности объекта указывает на то, что потенциальным местом формирования очага разрушения может быть сварной шов или зона локального нарушения формы.

Теоретическое значение разрушающего давления для испытываемой оболочки составляет 66 МПа, но формирование свища в два раза снизило ее несущую способность. В связи с этим актуальным является разработка метода оценки реального ресурса труб змеевиков реакционных печей для переработки углеводородного сырья.

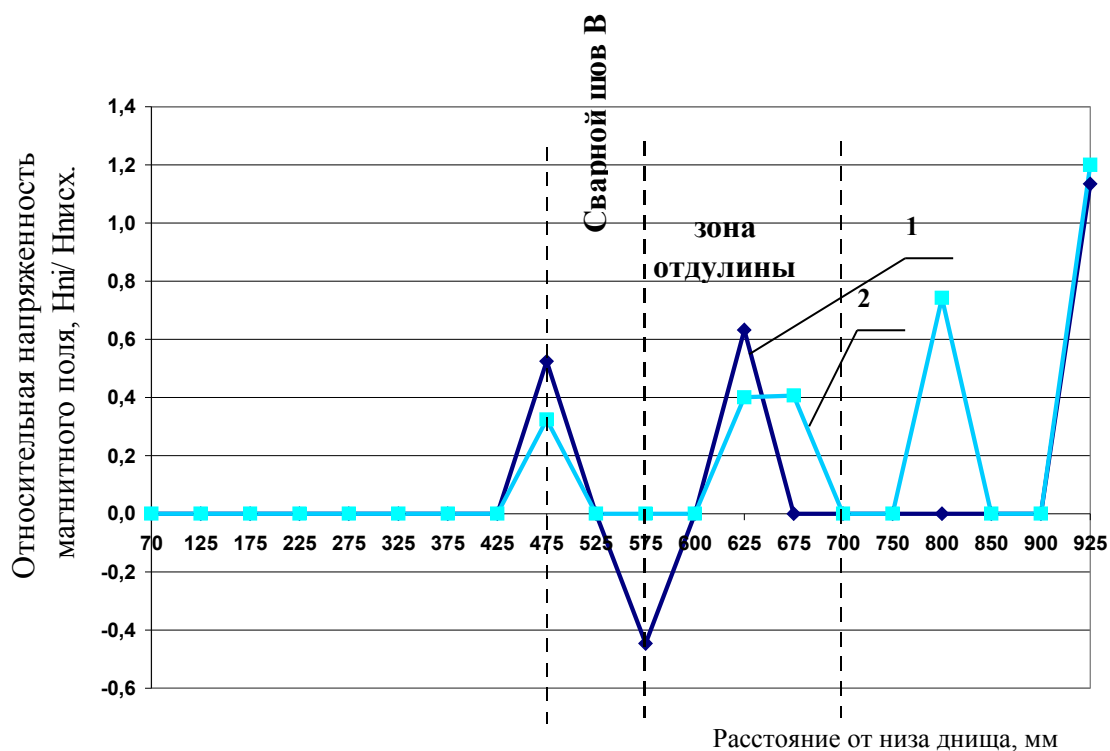


Рисунок 10. Распределение нормальной составляющей относительной напряженности постоянного магнитного поля в зоне 0 трубы:

- 1 - изменение нормальной составляющей относительной напряженности постоянного магнитного поля  $H_n/H_{нисх}$  при давлении 1 МПа
- 2 - изменение нормальной составляющей относительной напряженности постоянного магнитного поля  $H_n/H_{нисх}$  при давлении 2 МПа

### Выводы

Комплексные исследования изменения магнитных и акустических характеристик металла элемента трубы змеевика реакционной печи в процессе нагружения внутренним давлением позволили выявить формирование нескольких очагов возможного разрушения. В одном из локализованных мест сформировался свищ, который проявился при давлении 33 МПа. Формирование свища в два раза снизило несущую способность оболочки, поскольку теоретическое разрушающее давление составляет величину 66 МПа.

Актуальным является разработка методики оценки реальной несущей способности печных труб с учетом характера накопленных повреждений.

При тестировании АЭ-прибора обнаружались интенсивные акустические сигналы в зоне формирования свища еще до нагружения оболочки внутренним давлением. Это указывает на возможность нетрадиционного применения метода АЭ для раннего обнаружения зон возможного разрушения.

### Литература

1. Чиркова А.Г. Опасный производственный объект технологической системы: методы определения опасности и оценка технического состояния. -Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004.- 133 с.
2. Гупта Р.П., Мун П.Р. Анализ аварий в змеевике разбавляющего пара конвекционной секции пиролизной этиленовой печи // Нефтегазовые технологии, №10, 2006, с.93-94.
3. Агуадо Х. Минимизация закоксованности в трубах крекинг-печей // Нефтегазовые технологии, №1, 2007, с.78-81.
4. Shu-Но D. International Journal of Pressure Vessels and Piping.- №78 (2001), P.515-520.
5. Чиркова А.Г., Авдеева Л.Г., Симарчук А.С. Фрактальный анализ эволюции адаптации структуры стали 20Х23Н18 к условиям эксплуатации в печах пиролиза углеводородов. - СПб.: Недра, 2004.-88 с.

6. Кондрашова О.Г., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р. Определение ресурса безопасной эксплуатации нефтегазового оборудования путем оценки адаптивных свойств металла по изменению его магнитных характеристик.- Мировое сообщество: проблемы и пути решения: Сб. науч. ст.- Уфа: Изд-во УГНТУ, 2006.- №19, с.16-26.