



Г.А. Бигус, д-р техн. наук МГТУ им. Н.Э.Баумана;  
М.В. Черных, специалист “ИНТЕРЮНИС”,  
аспирант МГТУ им.Н.Э.Баумана;  
А.А. Чурилов, специалист “ИНТЕРЮНИС”;  
А.Е. Журавлев, специалист “ИНТЕРЮНИС”.  
G.A. Bigus, doctor of engineering sciences Postgraduate  
BMSTU;  
M.V. Chernykh, specialist “INTERUNIS”,  
Postgraduate BMSTU;  
A.A. Churilov, specialist “INTERUNIS”;  
A.E. Zhuravlev, specialist “INTERUNIS”.

Статья была опубликована в журнале «Сварка и  
Диагностика», 2015, №1, С. 45-50.

## **Анализ и выбор аппаратно-программных средств системы комплексного диагностического мониторинга для контроля опасных зон аппаратов колонного типа**

### **Analysis and choice of hardware and software of complex monitoring system to test dangerous zones of vertical vessels**

*Выполнен анализ и выбор аппаратно-программных средств системы комплексного  
диагностического мониторинга, методов контроля за дефектами и напряжениями в  
наиболее опасных зонах аппаратов колонного типа.*

*The analysis is made to choose hardware and software of complex monitoring system,  
testing method to look for defects and stresses in the most dangerous zones.*

**Ключевые слова:** ректификационная колонна, система мониторинга, акустическая  
эмиссия, ПАЭ, тензодатчик, инклинометр, напряженно-деформированное состояние,  
опасные зоны.

**Key words:** rectification column, monitoring system, acoustic emission, acoustic  
emission transducer, tensometric sensor, inclinometer, strain-stress state, danger zones.

#### **Введение**

Конструктивные особенности аппаратов для ректификации таковы, что они имеют  
значительную высоту и располагаются на открытых площадках. Также данное  
оборудование содержит значительное количество продукта и эксплуатируется в условиях  
внутреннего давления и высоких температур. Преобладающее большинство таких  
объектов относятся к опасным производственным объектам.

В процессе эксплуатации на колонный аппарат действует широкий спектр  
механических нагрузок - внешнее и внутреннее давление, собственный вес колонны и  
усилия от трубопроводов, сейсмические и ветровые воздействия. В результате действия  
этих нагрузок аппарат находится в сложном напряженно-деформированном состоянии  
(далее НДС) [1]. Наилучшим вариантом для определения НДС является установка на  
объект системы комплексного диагностического мониторинга (далее система  
мониторинга).

Система мониторинга – система, предназначенная для **оценки технического состояния** (диагностики) и **прогноза ресурса** оборудования опасных производственных объектов в реальном времени без их остановки, разборки и вывода из эксплуатации [2,3].

Система мониторинга **обеспечивает получение информации** о состоянии оборудования (объекта мониторинга) в необходимом количестве и качестве для обеспечения контроля его технического состояния. По результатам контроля система мониторинга **заблаговременно сигнализирует о необходимости принятия мер** с целью обеспечения требуемого запаса устойчивости технологической системы, качества ее функционирования, а также создает необходимый запас ее техногенной, экологической и экономической безопасности [2].

Одна из возможных структурных схем системы мониторинга Лель-М /A-Line 32D (DDM-M)/, предлагаемая группой компаний ООО “ИНТЕРЮНИС” представлена на рис. 1 и включает в себя следующие основные элементы (табл. 1).

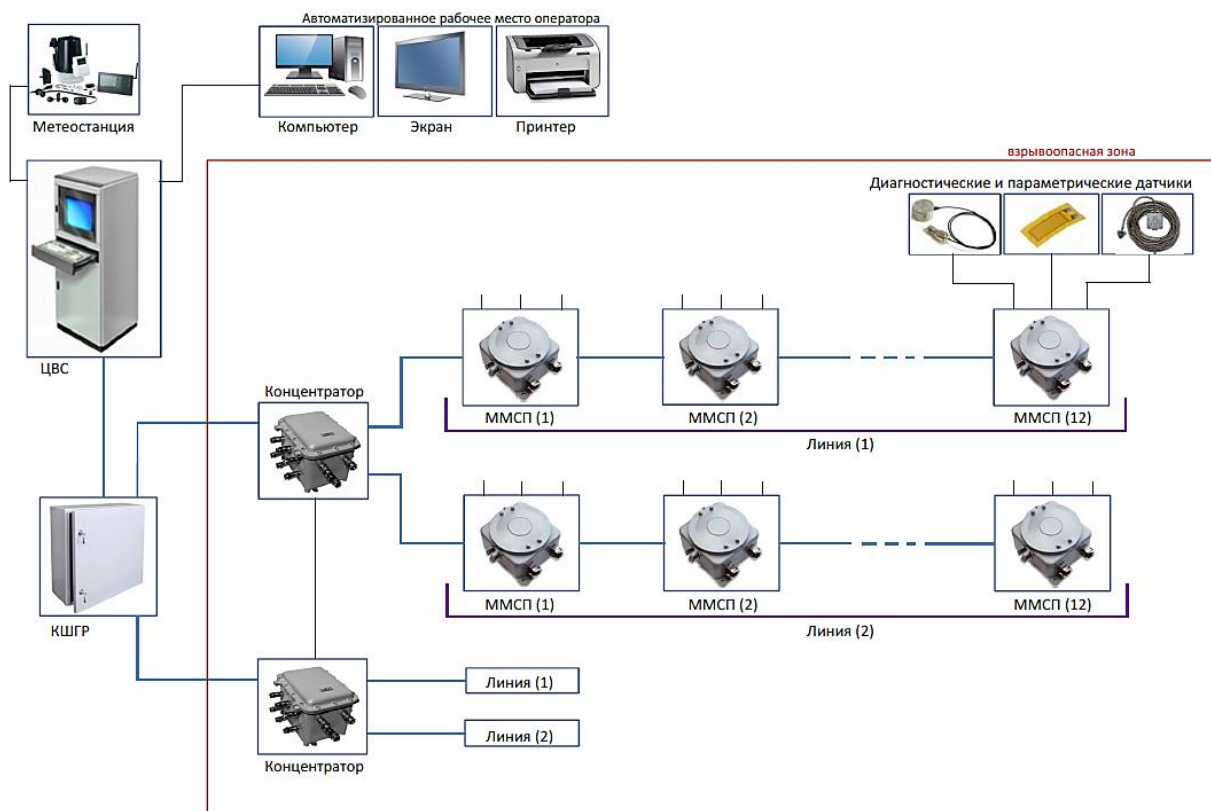


Рис. 1. Структурная схема системы мониторинга

Таблица 1. Основные элементы системы мониторинга

Элемент	Назначение
Диагностические и параметрические датчики	Предназначены для сбора первичной информации об объекте.
Многофункциональный модуль сбора и передачи данных (ММСП)	Производит оцифровку сигналов, полученных от датчиков, предварительную обработку и передачу сигналов далее в цифровом виде.
Концентратор	Организует измерительные линии из ММСП. Получает информацию от всех ММСП и направляет ее далее на обработку.
Коммутационный шкаф гальванической развязки (КШГР)	Обеспечивает измерительные линии питанием, ретранслирует данные полученные от концентраторов в центральную вычислительную станцию.
Центральная вычислительная станция (ЦВС)	Обрабатывает и отображает информацию оператору, архивирует данные.
Автоматизированное рабочее место оператора	Служит для ввода и вывода информации оператором.

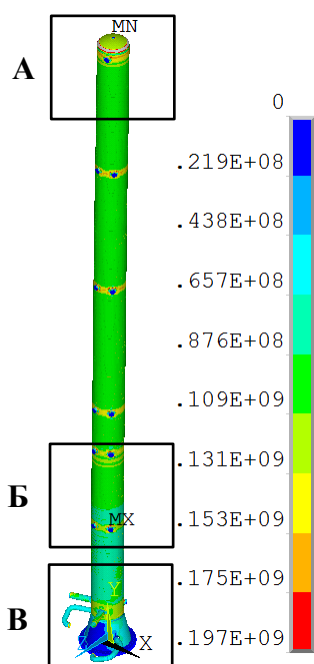


Рис. 2. Карта распределения эквивалентных напряжений по III теории прочности, Па

В [1] были определены необходимые задачи для установки системы мониторинга на ректификационную колонну, и рассмотрена первая из них - определение наиболее опасных зон для установки датчиков.

Были выбраны следующие опасные зоны (рис. 2):

А – зона верхняя (последняя обечайка и эллиптическое днище);

Б – зона максимальных напряжений (максимальное значение эквивалентных напряжений);

В – зона нижняя (опорная и первая обечайка, эллиптическое днище).

В данной статье рассматривается вторая задача - анализ и выбор аппаратно-программных средств, методов контроля за возникновением и развитием дефектов, напряжений в наиболее опасных зонах.

## Датчики системы мониторинга

В настоящее время существует огромное количество типов датчиков для определения различных параметров. С целью сбора данных, требуемых для определения технического состояния колонны и оценке НДС, было принято решение об установке следующих типов датчиков (табл. 2).

Таблица 2. Датчики системы мониторинга

Название	Назначение
Преобразователь акустической эмиссии (ПАЭ)	Регистрация и преобразование в электрический сигнал энергии упругих механических волн, распространяющихся от места зарождения и развития дефекта.
Тензометрический датчик (тензодатчик)	Преобразование величины деформации в электрический сигнал.
Датчик угла наклона (инклинометр)	Измерение угла наклона относительно гравитационного поля Земли и преобразование его в электрический сигнал.

### Преобразователь акустической эмиссии

Для регистрации и определения координат развивающихся дефектов и степени их опасности применяются ПАЭ.

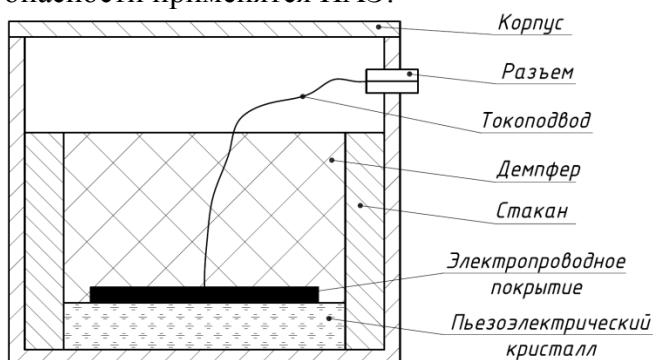


Рис. 3. Конструкция ПАЭ

пьезоэлектрический эффект) с формой напряжения сигнала, повторяющей форму волны. Эти импульсы поступают на предусилитель, усиливаются и на конечном этапе регистрации поступают на основную измерительную и обрабатывающую аппаратуру, где определяются характеристики волны - время прихода, амплитуда, длительность и т.д. Зная

Устройство и принцип работы.  
Основным элементом ПАЭ является пьезоэлектрический кристалл, преобразующий механическое движение в электрический сигнал. Кристалл помещается в стакан с демпфером, находящийся в специальном корпусе с разъемом (рис. 3). Датчик возбуждается механическими волнами, попадающими на его доньшко, и преобразует их в электрические импульсы (прямой

данные характеристики и положения датчиков на объекте, становится возможным определить координаты (произвести локацию) дефекта и степень его опасности.

ПАЭ устанавливаются для обеспечения контроля тех зон с высокими напряжениями, в которых вероятнее всего могут **возникнуть** или **начать развиваться** дефекты в процессе изготовления (труднодоступные места для сварки, многослойные швы, ограниченно свариваемые стали и пр.) или эксплуатации (коррозионные повреждения, усталость материала, области вблизи концентраторов напряжений и пр.).

В колонне концентраторами напряжений являются:

- кольцевой λ-образный элемент, соединяющий первую обечайку с нижним эллиптическим днищем и опорной обечайкой колонны (рис. 4, а);
- места приварки патрубков и подводящих трубопроводов к обечайкам и днищам (рис. 4, б).

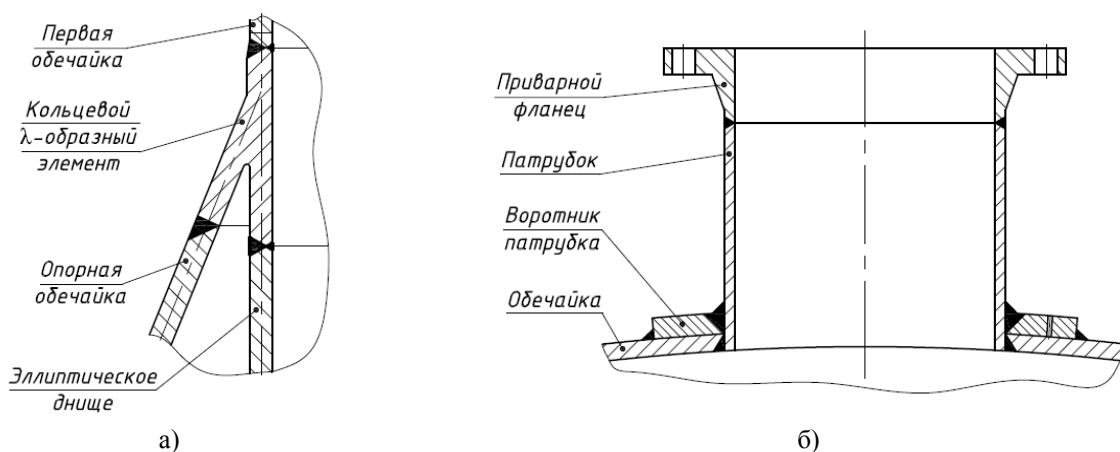


Рис. 4. Концентраторы напряжений:  
а) кольцевой λ-образный элемент, б) места приварки

При установке ПАЭ следует учитывать следующие условия:

- **регистрация сигнала АЭ проводится не менее чем тремя датчиками** (метод триангуляции);
- **использование минимального количества датчиков** при сохранении точности локации.

Зона регистрации дефекта датчиком определяется из:

$$L_{\text{рег}} = (A_{\text{д}} - A_{\text{п}}) / \delta, \text{ где}$$

$A_{\text{д}} = 92$  дБ - амплитуда активного источника АЭ;

$A_{\text{п}} = 50$  дБ - пороговое значение амплитуды шумов;

$\delta = 8$  дБ/м - коэффициент затухания акустических волн в материале колонны;

и составляет радиус 5,25 м вокруг датчика.

Исходя из перечисленных условий, были построены развертки карт локаций ПАЭ для контроля опасных зон (рис. 5).

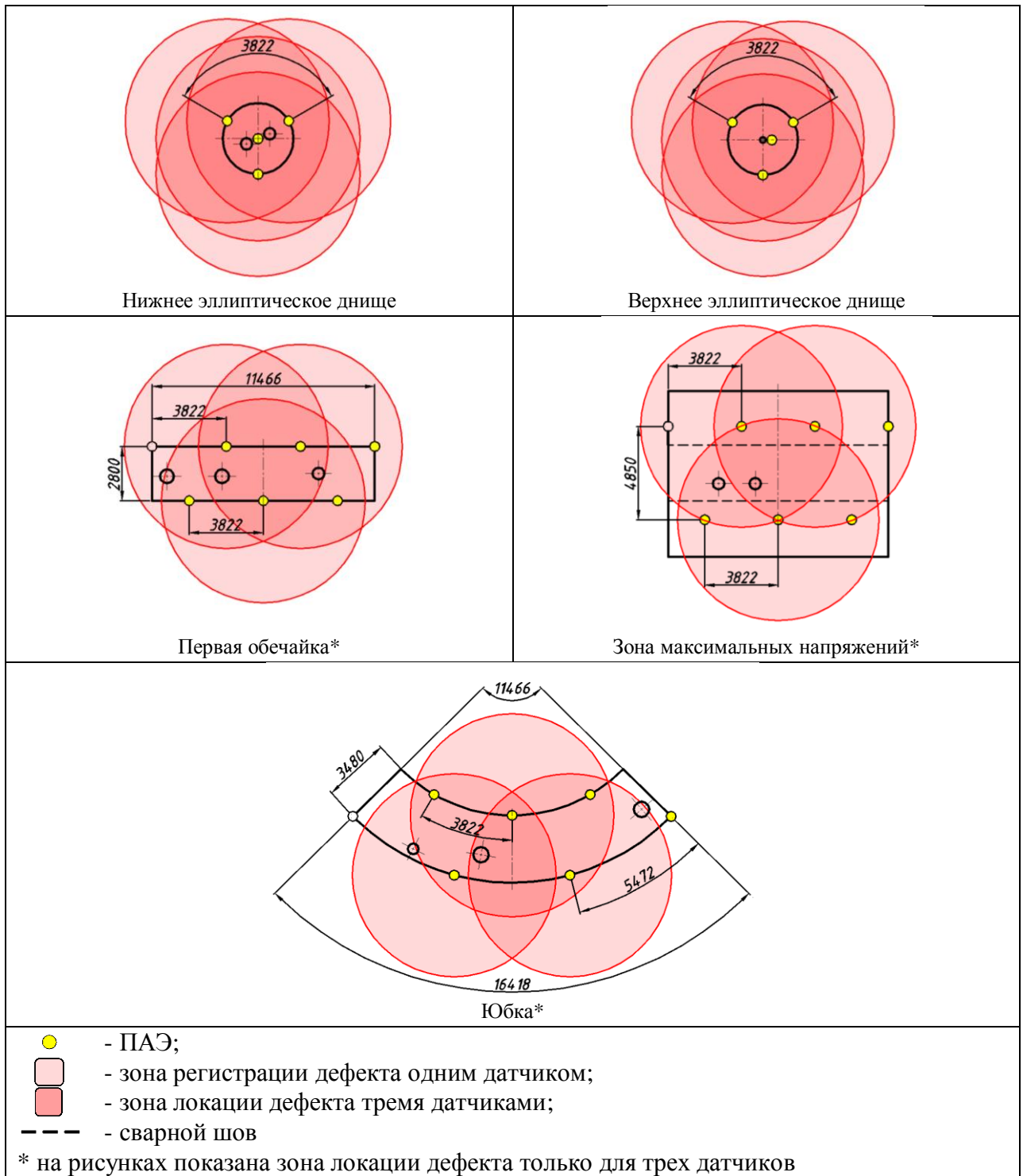


Рис. 5. Развертки карт локаций

Учитывая конструктивные особенности колонны, были приняты следующие схемы установки датчиков (табл. 3).

Таблица 3. Расположение ПАЭ

Зона	Схема установки датчиков
А	
Б	
В	
<p>+ 5/(7) – место установки и номер датчика ПАЭ с видимой/невидимой стороны</p>	

Для правильной интерпретации сигналов акустической эмиссии, возникающих при дожде, граде и других погодных явлениях, необходимо также учитывать показания метеостанции, входящей в систему мониторинга.

### Тензометрические датчики

Для определения напряжений, образующихся в объекте, на него устанавливают тензодатчики.

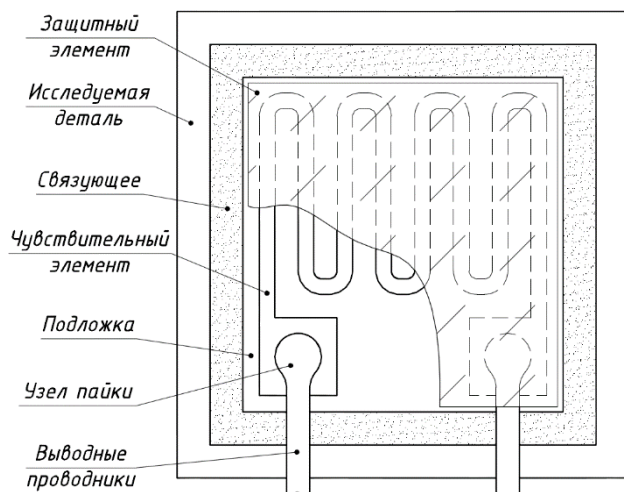


Рис. 6. Конструкция тензодатчика

элементом, и, за счет изменения его удельного сопротивления (тензорезистивный эффект), можно судить о величине этой деформации.

Тензодатчики следует устанавливать:

- **в местах с наилучшим откликом на внешние воздействия.** Наилучший отклик достигается в местах, где диапазон изменения измеряемого параметра (деформации) наибольший;

- **в местах отсутствия концентраций напряжений,** т.к. в данных зонах происходят резкие изменения деформаций, и отсутствует четко выраженная зависимость между показаниями тензодатчиков и НДС контролируемой зоны;

- **в местах, где измерение параметра (деформации) осуществляется (прямо или косвенно) не менее чем двумя датчиками.** В этом случае исключаются заведомо ложные показания, например, если один из датчиков выйдет из строя.

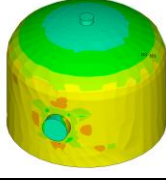

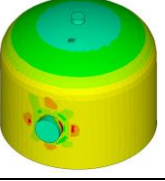
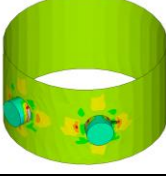

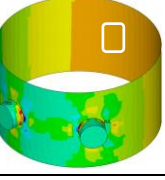
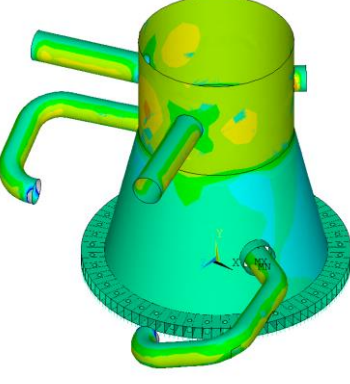
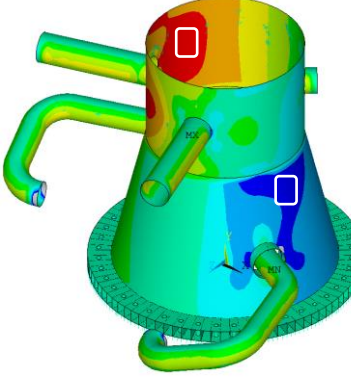
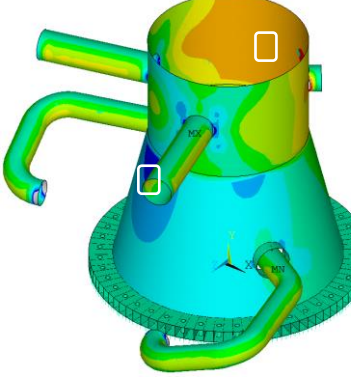
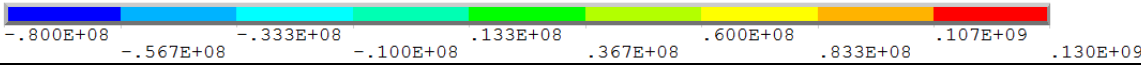
Для определения мест установки тензодатчиков были построены карты распределения продольных напряжений ( $S_Y$ ) для каждой опасной зоны при приложении расчетных нагрузок и воздействий (табл. 4).

#### Устройство и принцип работы.

Основной составляющей тензодатчика является чувствительный элемент, преобразующий деформацию твердого тела в электрический сигнал. Чувствительный элемент, имеющий выводные проводники для присоединения в сеть, помещается на упругую подложку и закрывается защитным элементом, а затем закрепляется с помощью связующего (клей, цемент) на исследуемой детали (рис. 6). Под действием силы происходит деформация упругой подложки вместе с чувствительным



Таблица 4. Карты распределения SY, [Па]

Зона	Карты распределения SY при направлении расчетного ветрового давления:		
	00	+OX	+OZ
А			
Б			
В			
			
<input type="checkbox"/> - места с наилучшим откликом			

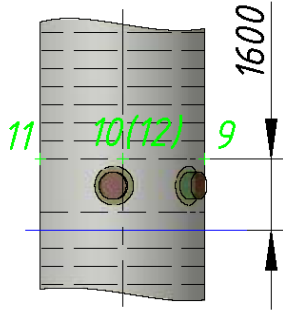
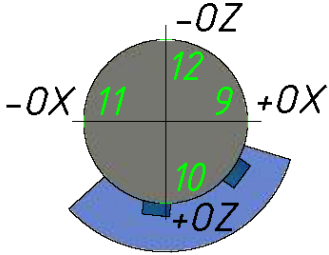
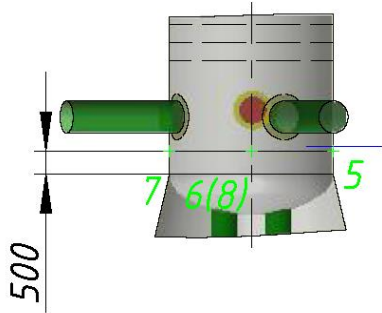
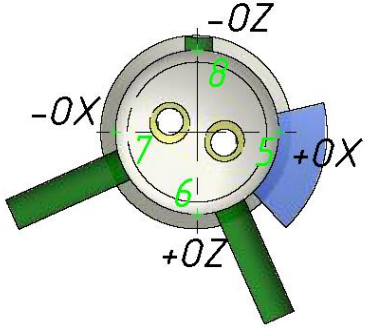
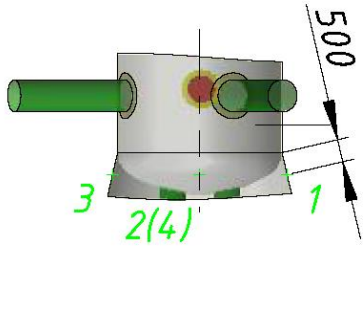
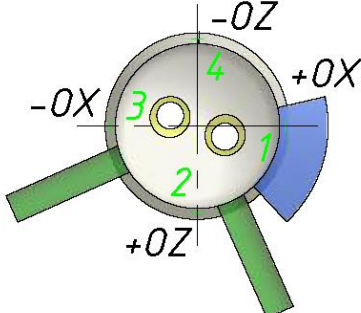
На основе карт распределения SY были выбраны места с **наилучшим откликом вне концентраций напряжений** (табл. 4). В данные места были установлены тензодатчики для контроля НДС опасных зон колонны.

Карты распределения при направлении ветрового давления -OX, -OZ аналогичны соответствующим картам при направлении +OX, +OZ, поэтому тензодатчики были установлены также на диаметрально противоположных сторонах обечаек колонны.

Для верхней зоны SY меняется незначительно при различном направлении ветрового давления, следовательно, установка датчиков в эту зону нецелесообразна.

Учитывая конструктивные особенности колонны, были приняты следующие схемы установки датчиков (табл. 5).

Таблица 5. Расположение тензодатчиков

Зона	Схема установки датчиков	
Б		
В		
		

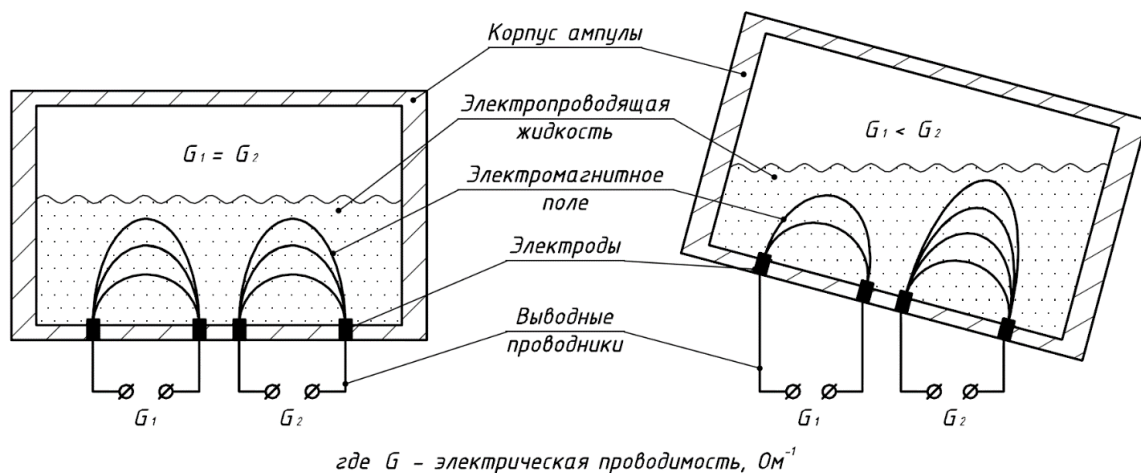
+ 2/(4) – место установки и номер тензодатчика с видимой/невидимой стороны

### Датчики угла наклона

Для определения угла наклона поверхности объекта применяются инклинометры.

**Устройство и принцип работы.** Основным чувствительным элементом инклинометра является ампула, установленная на печатной плате электронного преобразователя.

В нижней части ампулы, частично наполненной электропроводящей жидкостью, размещены электроды, располагаемые параллельно к оси наклона датчика. При подаче переменного напряжения на оба электрода генерируется распределенное электромагнитное поле. Снижение уровня жидкости, возникающее при наклоне датчика, вызывает "стягивание" (редуцирование) такого поля. Это, в свою очередь, вызывает пропорциональное уровню жидкости изменение электрического сопротивления электролита с постоянной электропроводностью. Благодаря дифференциальному принципу измерений с двумя парами электродов на выходе датчика обеспечивается знаковозависимый сигнал, пропорциональный углу наклона (рис. 7).



где  $G$  - электрическая проводимость,  $Om^{-1}$

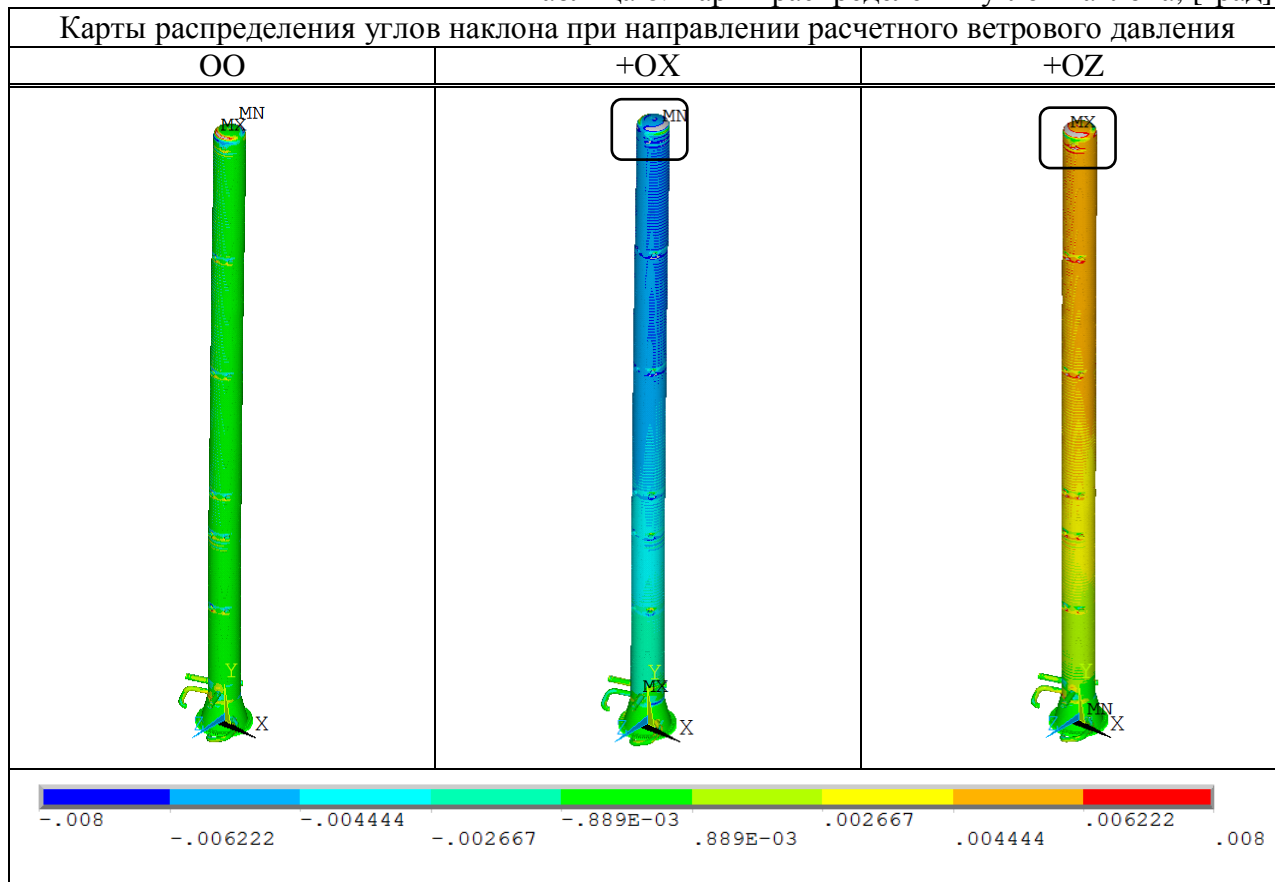
Рис. 7. Конструкция инклинометра

Инклинометры следует устанавливать:

- в местах с наилучшим откликом на внешние воздействия. Наилучший отклик достигается в местах, где диапазон изменения измеряемого параметра (угла наклона) наибольший;
- в местах, где измерение параметра (угла наклона) осуществляется (прямо или косвенно) не менее чем двумя датчиками. В этом случае исключаются заведомо ложные показания, например, если один из датчиков выйдет из строя.

Для определения мест установки инклинометров были построены карты распределения углов наклона колонны при приложении различных величин воздействий и выбраны места наилучшего отклика (табл. 6).

Таблица 6. Карты распределения углов наклона, [град]



□ - зона с наилучшим откликом

На основе карт распределения углов наклона была выбрана **зона с наилучшим откликом** (табл. 6). В данную зону были установлены инклинометры для контроля НДС опасных зон колонны.

Т.к. контролировать один и тот же параметр требуется минимум двумя датчиками, то инклинометры были установлены попарно в двух взаимно перпендикулярных диаметрально противоположных сторонах обечайки колонны.

Учитывая конструктивные особенности колонны, были приняты следующие схемы установки датчиков (табл. 7).

Таблица 7. Расположение инклинометров

Зона	Схема установки датчиков
А	
+ 2/(4) – место установки и номер инклинометра с видимой/невидимой стороны	

### Заключение

В результате на колонну были установлены датчики в следующем количестве (табл. 8).

Таблица 8. Установленные датчики

Датчик	Кол-во, шт.	Зона установки	Контроль
ПАЭ	20	А	<b>пластических деформаций и развивающихся дефектов</b> в местах изменения радиуса кривизны верхнего эллиптического днища.
		Б	<b>пластических деформаций и развивающихся дефектов</b> в местах приварки патрубков к обечайке.
		В	<b>пластических деформаций и развивающихся дефектов</b> в местах соединения опорной и 1ой обечайки, местах изменения радиуса кривизны нижнего эллиптического днища, а также приварки патрубков на 1ой обечайке.
Тензодатчик	12	Б	<b>максимальных эквивалентных напряжений</b> в зонах концентраций.
		В	<b>максимальных сжимающих напряжений</b> в опорной и 1ой обечайке.
Инклинометр	4	А	<b>максимальных эквивалентных напряжений</b> в опорной и 1ой обечайке.

Схема установки всех датчиков системы мониторинга представлена на рис. 8.

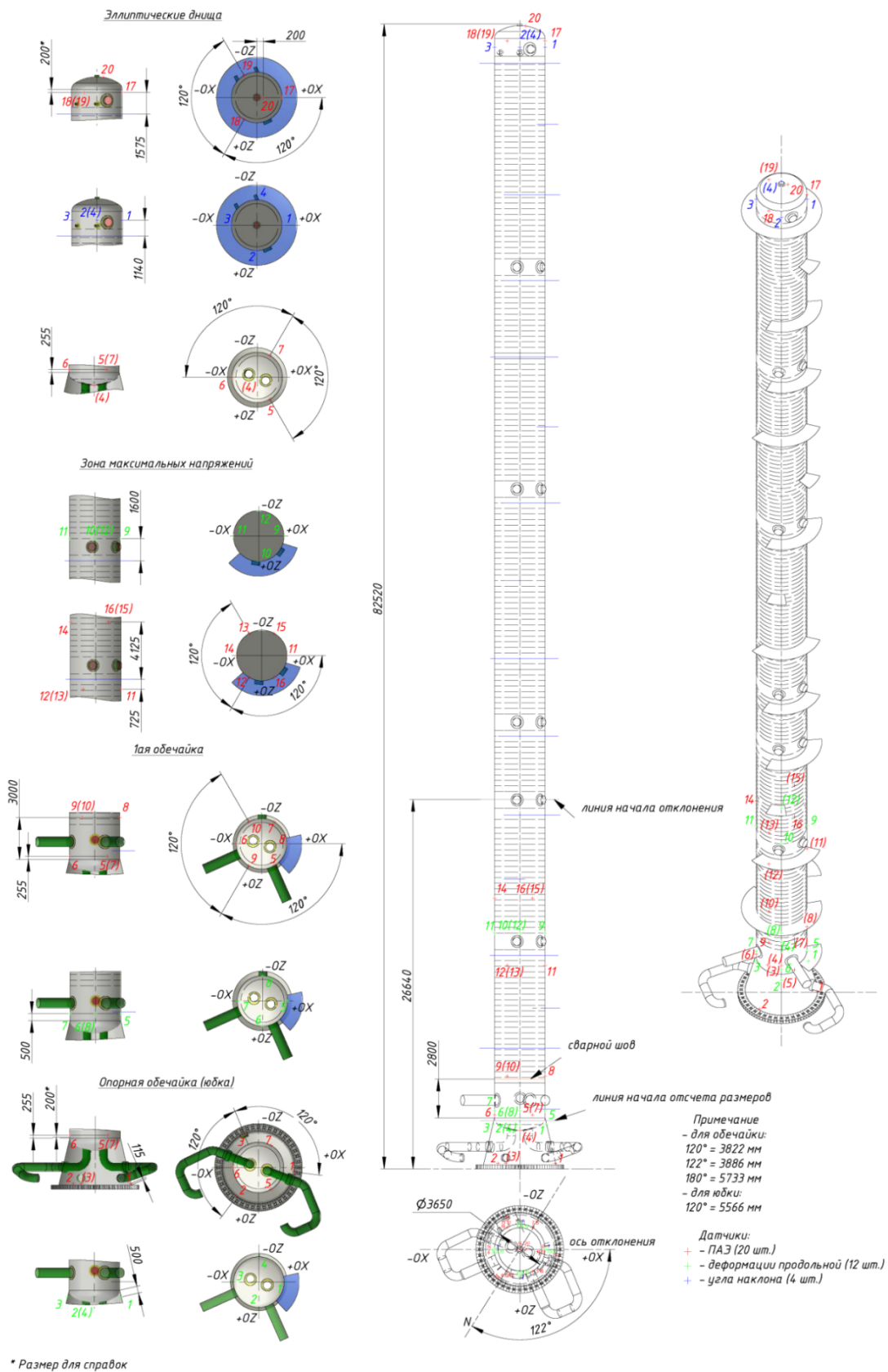


Рис. 8.Схема установки датчиков системы мониторинга

## Выводы:

В результате проведенной работы было установлено:

- для установки тензодатчиков необходима предварительная оценка НДС объекта контроля расчетными методами для исключения установки тензодатчиков в зоне концентраций напряжений.
- были определены места для установки тензодатчиков, для получения наилучшего отклика на воздействие ветровой нагрузки.
- для установления истинных показаний НДС необходима установка не менее 4х тензодатчиков в одном сечении колонны.
- на основе расчетов НДС были определены наиболее вероятные зоны возникновения и развития дефектов для установки в них ПАЭ.

## Список литературы

1. Бигус Г.А., Черных М.В. Определение наиболее опасных зон аппаратов колонного типа для установки датчиков системы мониторинга // «Сварка и Диагностика», 2014, №2, С. 42-45.
2. ГОСТ Р 53564-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системам мониторинга / – Введ. 01.01.2011. - М.: «Стандартинформ», 2010. - 20 с.
3. Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев. Техническая диагностика опасных производственных объектов. - М. : Наука. 2010. 416 с.
4. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии / Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. Вибродиагностика.-М.:Машиностроение, 2005.-829 с.: ил.
5. Гостёнова Е.А., Тляшева Р.Р., Кузеев И.Р. Оценка влияния трубопроводной обвязки на взрывоустойчивость аппарата колонного типа // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2010. №1 С. 1-11.  
URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Gostenova/Gostenova\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Gostenova/Gostenova_1.pdf)