

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»  
Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

\_\_\_\_\_

Должность, место работы

\_\_\_\_\_ В.С.Рыбин

Подпись

И.О. Фамилия

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ М.А. Иванов

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Расчет усталостной прочности и оптимизация сварного соединения трубной  
доски конденсатора промышленного дистиллятора

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
(МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ)  
ЮУрГУ-15.04.01.2017.118. ПЗ ВКР**

Руководитель ВКР

к.т.н., доцент ЮУрГУ  
Должность

\_\_\_\_\_ В.С.Рыбин  
И.О., Фамилия

Подпись

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Автор ВКР

магистрант группы П-246

\_\_\_\_\_ И.Ш. Гильманов

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Нормоконтролёр  
преподаватель

\_\_\_\_\_ Ю.В. Безганс

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Челябинск, 2017

количество ремонтных работ принесет большую экономию денежных средств, выделяемых на обслуживание дистиллятора, для ТЭЦ.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 Описание конструкции промышленного дистиллятора и режимов его работы	
1.1 Описание и характеристика оборудования.....	7
1.2 КИП и автоматика.....	11
2 Литературный обзор	
2.1 Обзор литературы, использованной в ВКР .....	13
3 Математическая модель напряженно-деформированного состояния узла трубной доски промышленного дистиллятора.....	15
4 Виды сварных соединений, используемые для изготовления узла трубных досок.....	24
5 Оптимизация сварного соединения узла трубной доски (по результатам расчета НДС)	
5.1. Сварочные материалы.....	26
5.2. Вариант ручной дуговой сварки.....	28
5.3. Вариант применения автоматической орбитальной сварки.....	30
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	38
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	39

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

## ВВЕДЕНИЕ

Дистиллятор — это аппарат, предназначенный для очищения воды путем ее тепловой перегонки. Применяется данный аппарат в теплоэнергетике для получения обессоленной воды, используемой для питания энергетических котлов. Промышленный дистиллятор обеспечивает производительность, равную 10...100 м<sup>3</sup>/ч. В таком устройстве умягченная вода поступает в испаритель, где нагревается до кипения, очищается от капельной влаги в сепараторе, после чего на стенках трубного пучка конденсатора образуется конденсат (дистиллят).

Возможно получение дистиллята с температурой не более +40°С с помощью охладителя дистиллята, который приобретается отдельно. Качество производимой воды соответствует требованиям ГОСТ 6709-72 «Вода дистиллированная» с показателем электропроводности менее 1 мкСм/см.

Особенности промышленных дистилляторов:

- корпус и трубные доски выполнены из углеродистой стали Сталь 20. ГОСТ
- трубный пучок – из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. ГОСТ
- для обеспечения герметичности корпус дистилляторы выполнен неразборным,
- для обеспечения компоновки корпуса дистилляторы выполнены прямоугольной формы.
- Возможность использования для охлаждения дистиллята охлажденной очищенной воды из технологической системы замкнутого водооборота (если она присутствует на предприятии).
- Промышленный дистиллятор работает в автоматическом режиме, для чего он оснащен регуляторами поддержания теплового и гидравлического режима.
- Дистиллятор работает в вакуумном режиме, поэтому для обеспечения бескавитационных режимов насосного оборудования он поднят на отметку +9 м.

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

## 1 Описание конструкции промышленного дистиллятора и режимов его работы.

### 1.1 Описание и характеристика оборудования

Термообессоливающий комплекс на базе промышленного дистиллятора предназначен для выработки обессоленной воды (дистиллята) для питания паровых энергетических котлов давлением до 13,8 МПа. Начиная с 1999 г, внедрено около 30 термообессоливающих комплексов: Уфимская ТЭЦ-2, Казанская ТЭЦ-3, Безымянская ТЭЦ, Райчихинская ГРЭС, ТЭЦ ССГПО (Казахстан, г. Рудный) и др.

Промышленный дистиллятор содержит последовательно включенные конденсаторы, предназначенные для конденсации в межтрубном пространстве пара. Трубные пучки закреплены в прямоугольных трубных досках, к которым с внешней стороны примыкают водяные камеры для подвода в трубный пучок охлаждающей воды.

С целью повышения энергетической эффективности дистиллятор работает в вакуумном режиме, при котором давление в камерах определяется давлением насыщенного пара. Для конденсации пара через трубные пучки подается охлаждающая вода с начальной температурой в первой по ходу воды ступени +20°С.

Различие в температурах корпуса и трубных пучков приводит к дополнительным температурным напряжениям, которые в номинальном режиме малы, но их учет необходим в первой по ходу воды ступени, где возможна существенная разность температур из-за низкой начальной температуры охлаждающей воды. Кроме того, в первых по ходу ступенях трубный пучок выполнен из аустенитной стали, а весь корпус аппарата – из углеродистой, что является дополнительным фактором возникновения существенных температурных напряжений. При эксплуатации аппарата особое внимание уделяется герметичности трубной системы, в том числе, сварных соединений, поскольку даже незначительное попадание исходной воды в паровое пространство неизбежно ведет к резкому ухудшению качества дистиллята.

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

Проект посвящен совершенствованию технологии изготовления конденсаторов, входящих в состав ступеней ИМВ. В первую очередь это относится к последним ступеням ИМВ, в которых трубная система выполнена из стали 12Х18Н10Т, а трубные доски и корпус – из стали 20. В рабочем режиме по трубкам Ø32x2,5 конденсатора пропускается вода, температура которой на 30...40 °С ниже температуры пара, заполняющего межтрубное пространство конденсатора. Вследствие разных температур и различных коэффициентов теплового расширения трубок и стенок конденсатора в трубках возникают напряжения растяжения, превышающие предел текучести. Значительные по величине напряжения возникают также в сварных швах крепления труб в трубных досках.

Принимая во внимание периодичность работы энергетического оборудования, в том числе, и ИМВ, трубная система конденсаторов и сварные швы работают в режиме малоциклового усталости при напряжениях, превышающих предел текучести.

К плотности сварных швов предъявляются очень высокие требования, поскольку даже незначительное перетекание необработанной воды из трубок в межтрубное пространство через усталостные трещины ведет к недопустимому повышению содержания получаемого дистиллята.

Основной целью работы является совершенствованию технологии изготовления конденсаторов ИМВ с целью предотвращения возникновения усталостных трещин в трубной системе и сварных швах.

#### Характеристики оборудования.

Термообессоливающий комплекс скомпонован из нестандартного и серийно выпускаемого оборудования. Комплектность оборудования приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень оборудования термообессоливающего комплекса на базе ИМВ50-16

№	Наименование	К-во, шт.	Характеристики	Примечание
1.	Первый корпус ИМВ 50-16	1	-	Нестанд. об-ние
2.	Второй корпус ИМВ 50-16	1	-	Нестанд. об-ние
3.	Деаэратор вакуумный	1	Д = 50 т/ч	Нестанд. об-ние
4.	Подогреватель головной	1	F = 219 м <sup>2</sup>	Серийн. об-ние
5.	Бак дистиллятный	1	V = 3 м <sup>3</sup>	Нестанд. об-ние
6.	Бак циркводды	2	V = 10 м <sup>3</sup>	Нестанд. об-ние
7.	Насос дистиллятный	2	К 50-80-250а/2	Серийн. об-ние
8.	Насос циркводды	2	1Д 500-63а	Серийн. об-ние
9.	Эжектор	1	ЭВ-220	Нестанд. об-ние

Общие габаритные размеры одного комплекса, м:

- Длина 12
- Высота 10

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Схема промышленного дистиллятора представлена на рисунке 1.

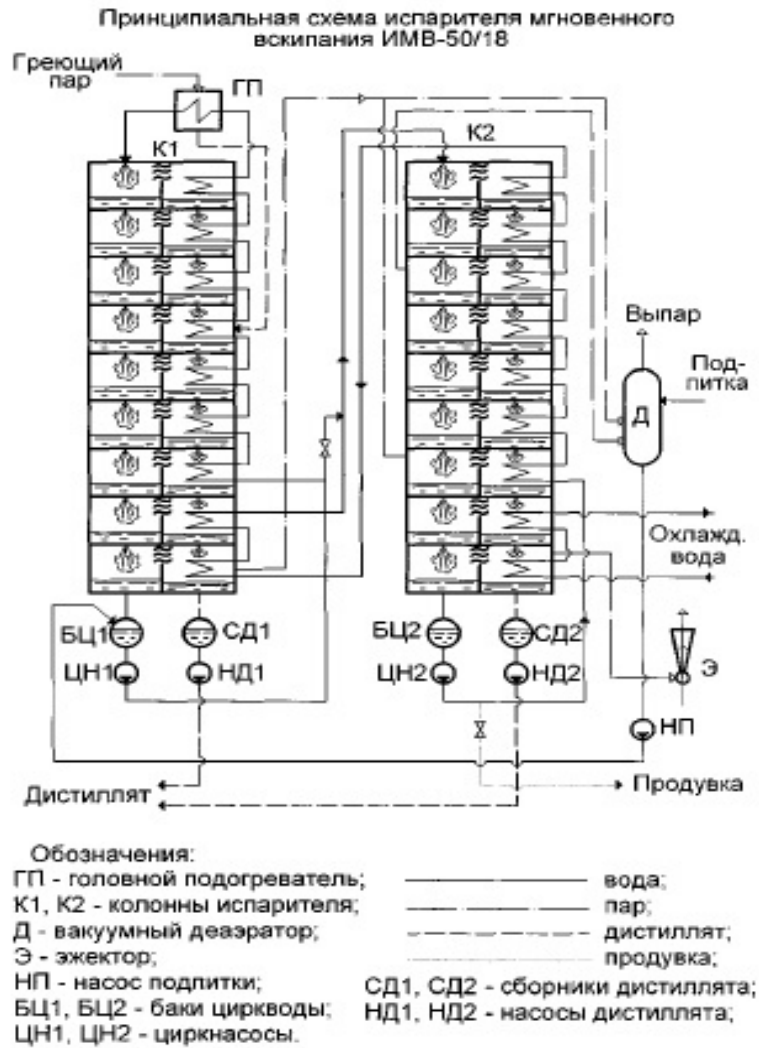


Рисунок 1

Техническая характеристика дистиллятора представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Основные технические характеристики испарительной установки ИМВ50-16

№ п/п	Наименование параметра	Количественная характеристика
1	Производительность по дистилляту (номинальная), т/ч	50
2	Число ступеней, шт.	16
3	Теплообменная поверхность, м <sup>2</sup>	4000
4	Материал корпуса	сталь 20
5	Материал труб поверхностей нагрева: ступеней 1...14 ступеней 15-16	сталь 20 сталь 12Х18Н10Т

6	Габариты ИМВ 50-16, м:	
	высота	6,85
	длина	7,30
	ширина	4,70
7	Масса, т:	
	без воды	120
	заполненного водой	214
8	Расход циркуляционной воды:	
	- первого контура, т/ч	500
	- второго контура, т/ч	500
9	Рабочее избыточное давление циркуляционной воды, кгс/см <sup>2</sup>	3,5
10	Расход продувочной воды, т/ч	3...5
11	Расход охлаждающей воды, т/ч	70...120
12	Рабочее избыточное давление охлаждающей воды, кгс/см <sup>2</sup>	3,5 (до 8,0)
13	Параметры пара-теплоносителя:	
	- давление, кгс/см <sup>2</sup> (абс.)	1,2
	- расход, т/ч	7,4
14	Годовая наработка, час, не менее	8000

Описание конструкции испарителя и технологии.

Термообессоливающий комплекс включает испаритель мгновенного вскипания ИМВ 50-16, циркуляционные насосы, головной подогреватель, дистиллятные насосы, баки для сбора циркуляционной воды, бак для сбора дистиллята, водоструйный эжектор. Установка оснащена необходимой регулирующей и запорной арматурой, системой контроля и автоматического управления технологическим процессом.

Испаритель мгновенного вскипания состоит из двух корпусов, каждый из которых содержит по восемь ступеней, скомпонованных в вертикальной сборке друг над другом. Процесс получения дистиллята организован по двухконтурной схеме. Гидравлическая схема каждого контура включает один корпус испарителя и один циркуляционный насос.

Каждая ступень испарителя представляет собой технологическую пару (ячейку): камера расширения – конденсатор. Камера расширения содержит перетечные отверстия, через которые происходит переток циркуляционной воды из верхней ступени в нижнюю. Камера расширения и конденсатор разделены перегородкой, в которой выполнены окна для прохода пара из расширителя в конденсатор ступени. Окна оснащены жалюзийными сепараторами, которые служат для очистки пара от капельной влаги.

Корпус конденсатора представляет собой прямоугольный короб, внутри которого расположены пучки труб, закрепленные на торцах в трубных досках. В торцевых частях корпуса расположены водяные камеры циркуловы.

Циркуловы насосом транспортируется по замкнутому контуру: насос – трубные пучки конденсаторов ступеней ИМВ (снизу вверх) – головной (паро-водяной) подогреватель – расширители ступеней ИМВ (самотеком сверху вниз) – циркубак – насос. После перегрева в головном подогревателе циркуловы последовательно самотеком проходит расширители ступеней ИМВ сверху вниз, при этом в каждом расширителе вскипает с понижением температуры на 3...4 °С по мере повышения вакуума. Образующийся при этом пар поступает в конденсаторы соответствующих ступеней и там превращается в дистиллят, конденсируясь на трубном пучке и передавая тепло протекающей по трубному пучку циркуловы.

Подогревателем циркуловы первого контура является головной подогреватель, в который подается сторонний греющий пар. Подпитка первого контура производится из системы водоподготовки ИМВ через регулятор. При двухконтурной схеме испарения коэффициент упаривания в первом контуре равен примерно 2. Часть потока циркуловы первого контура служит питательной водой второго и одновременно продувкой первого.

Подогрев циркуловы второго контура осуществляется в конденсаторе нижних ступеней первого контура вторичным паром. Коэффициент упаривания во втором контуре равен примерно 3,5...4,5. Продувка второго контура ИМВ-50-16 направляется в канализацию или может быть использована для подпитки теплосети. В зависимости от качества питательной воды величина продувки составляет 5...10 % от производительности комплекса.

Сбор дистиллята производится по каскадной схеме из конденсаторов верхних ступеней в нижние. Дистиллят накапливается в дистиллятном баке, а из него насосом направляется в коллектор конденсата на подпитку котлов.

Поддержание вакуума в испарителе достигается отсосом паровоздушной смеси водоструйным эжектором.

## 1.2 КИП и автоматика.

Система автоматического регулирования обеспечивает поддержание следующих технологических параметров:

- температуры циркуловы на входе в ступень № 1 для стабилизации производительности аппарата, которая поддерживается путем воздействия на клапан подачи греющего пара;
- уровня воды в баках циркуловы и в баках дистиллята обоих контуров испарителя для обеспечения подпора перед насосами;

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11



Термообессоливающий комплекс оснащен контрольно-измерительными приборами и средствами автоматики, обеспечивающими ее работу в автоматическом

режиме с периодическим контролем со стороны дежурного персонала.

Использование термообессоливающего комплекса не требует увеличения численности оперативного персонала.

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 2 Литературный обзор

### 2.1 Обзор литературы, использованной в ВКР

С.П. Тимошенко и С.Войновский-Кригер в своем пособии «Пластинки и оболочки издание второе» пишут, что задачи изгиба пластин сводятся к решению дифференциальных уравнений в частных производных, часто с переменными коэффициентами и при сложных краевых условиях. Точное решение известно только для отдельных сравнительно простых задач. Пластины, толщина которых не превышает одной пятой длины пролета, а прогиб не превосходит половины толщины пластины, исходя из гипотезы плоских сечений, с достаточной степенью точности может производиться аналогично расчету цилиндрического изгиба равномерно нагруженной прямоугольной, защемленной по краям пластинки или расчету аналогично нагруженной и закрепленной балки[1]. Т.е. согласно им, мы должны взять некое условное давление равное 1 МПа и для определения изгибающих моментов и прогибов цельной пластины, мы должны сперва рассчитать вспомогательные величины  $u_0$  и  $\psi_0$ , причем,  $u_0$  вычислить из не явно выявленной зависимости. Тем самым, мы сможем произвести оценку прогиба цельной пластины, т.е. нашей трубной доски.

Так же, при расчете полных напряжений (цепные + изгибные), если цепные напряжения малы, ими можно пренебречь в последующих расчетах.

В книге Григолюка Э.И., Фильштинский Л.А. «Перфорированные пластины и оболочки» представлен расчет деформаций перфорированных пластин, к которым безусловно относится трубная доска. За счет чего происходит деформация перфорированной пластины и для ее определения необходимо вводить поправочный коэффициент в величину цилиндрической жесткости цельно пластины. Зависимость этого коэффициента от диаметра и шага перфорации можно получить путем аппроксимации номограммы[2]. С помощью отношения цельной пластины, взятой в пособие С.П. Тимошенко и С.Войновский-Кригер, к перфорированной пластине, мы можем рассчитать максимальный прогиб перфорированной пластины.

В диссертации Парфудиной И.В. «Малоцикловая усталость элементов металлических конструкций при нерегулярном напряжении» после проведения опытов было выяснено, что после 3 циклов нагружения напряженно-деформированное состояние становится постоянным вплоть до образования усталостных трещин. Ею была предложена методика позволяющая определить оптимальный уровень однократной перегрузки, соответствующей максимальному сроку эксплуатации конструкции, работающий в

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

постоянном силовом циклическом воздействии. Это методика была предложена с той целью, для того чтобы избежать экстренных поломок и определить в какой период и на каком цикле могут образоваться усталостные трещины.

В статье Исмагилова А.З., Четвертковой О.В. “Оценка напряженно-деформированного состояния трубной решетки теплообменника” расчеты проводились в ПК Ansys. В расчетах было установлено, что напряжение изменяется вдоль радиуса решетки и характерной чертой является то, что во взаимно перпендикулярных плоскостях напряжение распределяется неравномерно. Так же была выявлена зависимость, в которой можно было проследить, как за счет давления прогибается трубная решетка.

В методическом пособии Донбасской государственной машиностроительной академии “Усталость сварных конструкций. Рекомендации по повышению выносливости и расчету на долговечность сварных узлов подъемно-транспортных и горнорудных машин ” описываются факторы определяющие сопротивление сварных соединений стальных конструкций усталостным разрушениям. В том числе остаточные напряжения, их концентрации и способы снижения напряжений. Так же в пособии приводятся меры по увеличению выносливости сварных соединений и расчеты, которые помогают определить момент зарождения и при каких условиях образуется усталость.

В автореферате диссертации Целищева М.Ф. “Напряженно-деформированное состояние элементов трубных систем кожухотрубных теплообменных аппаратов паротурбинных установок”, мы можем просмотреть весь спектр вопросов рассматриваемых в выпускной квалификационной работе. Так как там рассматриваются такие вопросы как: влияние напряженно-деформированного состояния элементов теплообменного аппарата на их надежность, влияние эксплуатационного износа трубных систем, анализ прочностного расчета элементов теплообменного аппарата, исследование напряженно-деформированного состояния трубных досок теплообменного аппарата, влияние характера закрепления трубных досок в корпусах прямотрубных теплообменных аппаратов на их напряженно-деформированное состояние, влияние температурных неравномерностей в трубных досках на их напряженно-деформированное состояние, моделирование напряженно-деформированного состояния трубной доски под воздействием перепада давлений теплоносителя.

Согласно предварительному анализу напряженно-деформированное состояние сварных швов, соединяющих трубки и трубную доску, в значительной степени определяется краевым эффектом, вследствие которого металл сварного шва испытывает не только напряжения растяжения, но и изгибные напряжения. Расчет соотношения между напряжениями растяжения и изгибными напряжениями, возникающими вследствие краевого эффекта, выполнен в монографии Феодосьева В.И. “Сопротивление

материалов”. В частности, если изгибные напряжения при рабочем давлении близки к

15.04.01.2017.118.00 ПЗ

Лист

14

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

допустимым напряжениям стали, то прочность конструкции не вызывает серьезных опасений и сильного влияния изгибных напряжений ожидать не стоит. Однако, поверхность пластины подвергается напряженно-деформированному состоянию и в зоне перфорации, т.е. там где отверстия в пластине, создается угроза прочности сварных швов, которые подвергаются сильной нагрузке благодаря краевому эффекту.

Так же для расчетов мы будем обращаться к нормативной документации ГОСТ Р 52857.1-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования и РД 10-249-98 Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды.

#### Выводы.

По результатам литературного обзора можно выявить следующее:

1. Промышленный дистиллятор работает в циклическом режиме. Это значит, что в процессе эксплуатации необходимыми будут запуск и остановка дистиллятора для проведения ремонтных работ при появлении усталостных трещин и остановки в экстренных случаях.
2. Трубная доска промышленного дистиллятора имеет сварное соединение с трубным пучком, которые находятся в условиях сложного напряженно-деформированного состояния из-за того, что на них воздействует разное давление воды и пара, а также, вследствие разности температур воды и пара, температурные деформации.
3. Оценка влияния неопределенно-деформированного состояния на трубную доску и ее сварные соединения представляет собой статически неопределенную задачу. Это обусловлено тем, что трубный пучок упруго воздействует на трубную доску.
4. В виду того, что в основном в проведенном обзоре литературы в режиме малоциклового усталости и напряженно – деформированном состоянии рассказывается про цельные пластины и трубные доски, оценка влияния напряженно- деформированного состояния нашей трубной доски будет осложняться наличием перфорации в трубной доске (т.е. наличием отверстий).

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

3 Математическая модель напряженно – деформированного состояния узла трубной доски промышленного дистиллятора.

С целью повышения энергетической эффективности дистиллятор работает в вакуумном режиме, при котором давление в камерах определяется давлением насыщенного пара. Для конденсации пара через трубные пучки подается охлаждающая вода с начальной температурой в первой по ходу воды ступени  $+20^{\circ}\text{C}$ .

Различие в температурах корпуса и трубных пучков приводит к дополнительным температурным напряжениям, которые в номинальном режиме малы, но их учет необходим в первой по ходу воды ступени, где возможна существенная разность температур из-за низкой начальной температуры охлаждающей воды. Кроме того, в первых по ходу ступенях трубный пучок выполнен из аустенитной стали, а весь корпус аппарата – из углеродистой, что является дополнительным фактором возникновения существенных температурных напряжений. При эксплуатации аппарата особое внимание уделяется герметичности трубной системы, в том числе, сварных соединений, поскольку даже незначительное попадание исходной воды в паровое пространство неизбежно ведет к резкому ухудшению качества дистиллята.

Принято, что напряженное состояние сварных швов трубной доски возникает вследствие следующих факторов:

- различие в температурах корпуса и трубных пучков,
- изгиб трубных досок под действием перепада давления со стороны водяных камер (до 0,4 МПа) и разряжения в паровом объеме аппарата (до 0,02 МПа абс.).

Конструктивные и режимные параметры конденсаторов дистиллятора:

- размеры трубной доски, опираемой на жесткий корпус:  $a=700$  мм,  $b=395$  мм,  $H=36$  мм,
- размеры перфорированной поверхности трубной доски, опираемой на корпус:  $a_1=564$  мм,  $b_1=343$  мм,
- межцентровое расстояние отверстий трубной доски:  $t=37$  мм,
- количество отверстий опираемой части трубной доски:  $n=109$ ,
- наружный и внутренний диаметры трубки:  $d_n=25$  мм,  $d=20$  мм,
- площадь металлического сечения трубки:  $S_f=176,6$  мм<sup>2</sup>,
- длина трубного пучка:  $L=4000$  мм,
- давление охлаждающей воды в водяной камере:  $p=0,4$  МПа,
- температура корпуса конденсатора  $T_k=40^{\circ}\text{C}$ ,

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

- расчетная температура охлаждающей воды при нарушении режима  $T_{тр}=15^{\circ}\text{C}$  (при начальной температуре  $+4...+6^{\circ}\text{C}$ ),
- начальная температура изготовления аппарата -  $20^{\circ}\text{C}$ .

Конструктивно трубная доска жестко соединена сварными швами с одной стороны с корпусом конденсатора, с другой - с корпусом водяной камеры, имеющих жесткое коробчатое сечение, и потому принятыми в расчете абсолютно жесткими. Расчет напряженно-деформированного состояния трубной доски выполнен в предположении, что она представляет собой прямоугольную перфорированную пластину с заземленными по контуру сторонами, испытывающую избыточное давление (равномерно распределенную нагрузку) со стороны водяной камеры и лежащую на упругом основании со стороны трубного пучка.

Задачи изгиба пластин сводятся к решению дифференциальных уравнений в частных производных, часто с переменными коэффициентами и при сложных краевых условиях. Точное решение известно только для отдельных сравнительно простых задач. С практической точки зрения согласно [1, 2] пластины, толщина которых не превышает одной пятой длины пролета, а прогиб не превосходит половины толщины пластины, исходя из гипотезы плоских сечений, с достаточной степенью точности может производиться аналогично расчету цилиндрического изгиба равномерно нагруженной прямоугольной, заземленной по краям пластинки или расчету аналогично нагруженной и закрепленной балки.

Согласно [1] для определения изгибающих моментов и прогибов цельной пластины под действием условного давления  $p_0=1$  МПа определены вспомогательные величины  $u_0$  и  $\psi_0$ , причём  $u_0$  вычислен из неявно выявленной зависимости:

$$\frac{E^2 * h^8}{(1-\mu^2)^2 * p_0^2 * b^8} = -\frac{81}{16 * u^7 * \tanh(u)} - \frac{27}{16 * u^6 * (\sinh(u))^2} + \frac{27}{4 * u^8} + \frac{9}{8 * u^6} \quad (1)$$

$$u_0 = 5,234 \times 10^{-2}$$

$$\psi_0 = \frac{3 * (u_0 - \tanh(u_0))}{u_0^2 * \tanh(u_0)} = 0,9998 \quad (2)$$

Напряжения цепные (на концах средней линии) при условном давлении

$$\sigma_{доц} = \frac{E * u_0^2}{3 * (1-\mu^2)} * \left(\frac{h}{b}\right)^2 = 5,573 \times 10^5 \text{ (Па)} \quad (3)$$

Напряжения изгибные в цельной пластине при условном давлении $p_0 = 1$ МПа:				Лист
15.04.01.2017.118.00 ПЗ				17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$\sigma_{дои} = \frac{p_0}{2} * \left(\frac{b}{h}\right)^2 * \psi_0 = 1,89 \times 10^8 \text{ (Па)} \quad (4)$$

Полные напряжения (цепные + изгибные):

$$\sigma_0 = \sigma_{доц} + \sigma_{дои} = 1,896 \times 10^8 \text{ (Па)} \quad (5)$$

Доля цепных напряжений в объеме полных напряжений пластины менее 0,3 %, поэтому в дальнейшем их можно не учитывать.

Максимальный изгибной момент при  $p_0 = 1$  МПа:

$$M_0 = \frac{h^2}{6} * \frac{p_0}{2} * \left(\frac{b}{h}\right)^2 * \psi_0 = 4,083 \times 10^4 \text{ (Н*м)} \quad (6)$$

Цилиндрическая жесткость цельной пластины:

$$D = \frac{E * h^3}{12 * (1 - \mu^2)} = 8,972 \times 10^5 \text{ (Н*м)} \quad (7)$$

Зависимость прогиба цельной пластины при условном давлении 1 МПа от координаты «х» исследуемого сечения, измеряемой от края пластины:

$$w_0(x) = \frac{p_0 * b^4}{16 * u_0^3 * D * \tanh(u_0)} * \left[ \frac{\cosh\left[u_0 * \left(1 - \frac{2 * x}{b}\right)\right]}{\cosh(u_0)} - 1 \right] + \frac{p_0 * b^2 * (b - x) * x}{8 * u_0^2 * D} \quad (8)$$

Максимальный прогиб на середине цельной пластины при  $x = \frac{b}{2}$ :

$$w_{0m} = w_0\left(\frac{b}{2}\right) = 6,967 \times 10^{-4} \text{ (м)} \quad (9)$$

Отношение среднего прогиба  $w_c$  цельной пластины длиной  $b$  к максимальному значению прогиба  $w_{0m}$ :

$$\vartheta_{0c} = \frac{w_c}{w_{0m}} = \frac{\int_0^b w_0(x) dx}{w_0\left(\frac{b}{2}\right)} = 0,533 \quad (10)$$

Деформация перфорированной пластины определена согласно [2] путем введения поправочного коэффициента в величину цилиндрической жесткости цельной пластины

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

Зависимость коэффициента  $\varphi$  от диаметра и шага перфорации получена аппроксимацией номограммы[2]:

$$\varphi \left( \frac{d_H}{t} \right) = 1,04 - 0,871 * \frac{d_H}{t} - 0,196 * \left( \frac{d_H}{t} \right)^2$$

(11)

Для исследуемой конструкции  $\varphi = 0,65$ , и после корректировки значения цилиндрической жесткости перфорированной пластины (трубной доски) ее максимальный прогиб составляет  $w_n = 1,738$  мм, а отношение среднего прогиба к максимальному значению  $\psi = 0,533$ .

Силовое воздействие трубного пучка на трубную доску, или иными словами, эффективное значение температурной реакции трубного пучка определено как реакция упругого основания (трубного пучка) на пластину (трубную доску) из условия совместимости деформаций при следующих допущениях:

- корпус конденсатора принят абсолютно жестким,
- имеется ранее принятое различие в рабочих температурах корпуса и трубного пучка, что создает соответствующие температурные напряжения и деформации:

$$\frac{\delta L_T}{q_T} = \frac{\vartheta * w_0 + \delta L_{0T}}{p_0} \quad (12)$$

где  $\delta L_T$  - зазор между сопрягаемыми точками трубной доски и трубного пучка при их условном отделении, который возникает вследствие различия рабочих температур корпуса и трубного пучка,

$w$  - прогиб трубной доски в эксплуатационных условиях,

$\delta L_{0T}$  - удлинение трубного пучка под действием силы, равной воздействию условного давления на трубную доску.

При свободном деформировании трубного пучка и корпуса (трубки условно отделены от доски) между торцом трубного пучка и доской возникает зазор:

$$\delta L_T = L * [(T_k - T_n) * \alpha_y - (T_{тр} - T_n) * \alpha_a] = 0,5 \text{ мм}, \quad (13)$$

где  $\alpha_y$  и  $\alpha_a$  - коэффициенты температурного расширения углеродистой ( $\alpha_y = 11,6 * 10^{-6}$ ) и аустенитной стали ( $\alpha_a = 16,6 * 10^{-6}$ ),

$T_k$ ,  $T_{тр}$  и  $T_n$  - температуры, соответственно, корпуса  $T_k = 40^\circ\text{C}$ , трубок  $T_{тр} = 26^\circ\text{C}$  и изготовления  $T_n = 20^\circ\text{C}$ .

Прогиб  $w$  трубной доски в эксплуатационных условиях обусловлен совместно воздействием рабочего давления в водяной камере и температурной реакции трубного

	пучка и пропорцио	нален де	формациям под действием условного давления:	Лист
			15.04.01.2017.118.00 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
				19



$$\frac{q_T}{\delta L_T} = \frac{p_0}{\vartheta * w_{om} + \delta L_{OT}} \quad (14)$$

где  $q_T$  - температурная реакция трубного пучка, эквивалентное равномерному давлению на площадь трубной доски,

$\vartheta$  – ранее вычисленное отношение среднего прогиба пластины к максимальному значению прогиба, использованное для приведения формы прогиба трубной доски к условному равномерному перемещению доски как жесткого целого ( $\vartheta=0,533$ ).

Удлинение  $\delta L$  трубного пучка под действием силы, равной воздействию условного давления на трубную доску, определено из уравнения упругих деформаций:

$$\delta L = \frac{L}{E} * \frac{p_0 * a * b}{n * f_T} \quad (15)$$

где  $n$  и  $f_T$  – количество и площадь сечения трубок по металлу  $f_T = \frac{\pi}{4} * (d_n^2 - d^2)$ .

Эффективное значение температурной реакции трубного пучка:

$$q_T = \frac{\delta L_T * p_0}{\vartheta * w_{om} + \delta L_{OT}} = 0,338 \text{ МПа} \quad (16)$$

Принимая во внимание малый прогиб трубной доски на периферии в сравнении с центральными трубками пучка, оценка напряжения растяжения выполнена для периферийных трубок, как наиболее нагруженных, без учета прогиба трубной доски:

$$\sigma_T = \frac{q_T * a * b}{n * f_T} = 9,6 \text{ МПа} \quad (17)$$

В сварных швах, соединяющих трубки с трубными досками, возникают напряжения среза с допускаемыми значениями согласно [10]:

$$[\tau] = 0,65 * [\sigma] * \varphi_c,$$

где  $[\sigma] = 117 \text{ МПа}$  – допускаемое напряжение для стали 20 [1],

$\varphi_c = 0,6$  – коэффициент прочности углового сварного соединения при выборочном контроле или при его отсутствии [9].

Допускаемое осевое напряжение в трубке из условия прочности сварного соединения:

$$[\sigma]_c = \frac{0,65 * [\sigma] * \varphi_c * S_c}{S_T} = 62,4 \text{ МПа} \quad (18)$$

где  $S_T$  - площадь среза сварного шва, определяемая по наружному диаметру трубки и глубине провара, равной толщине трубки,  $S_c = 196,3 \text{ мм}$ .

Таким образом, напряжения в трубном пучке при рабочих условиях существенно ниже допускаемых значений, и потому прочность трубок на разрыв и сварных швов на срез не вызывает сомнений.

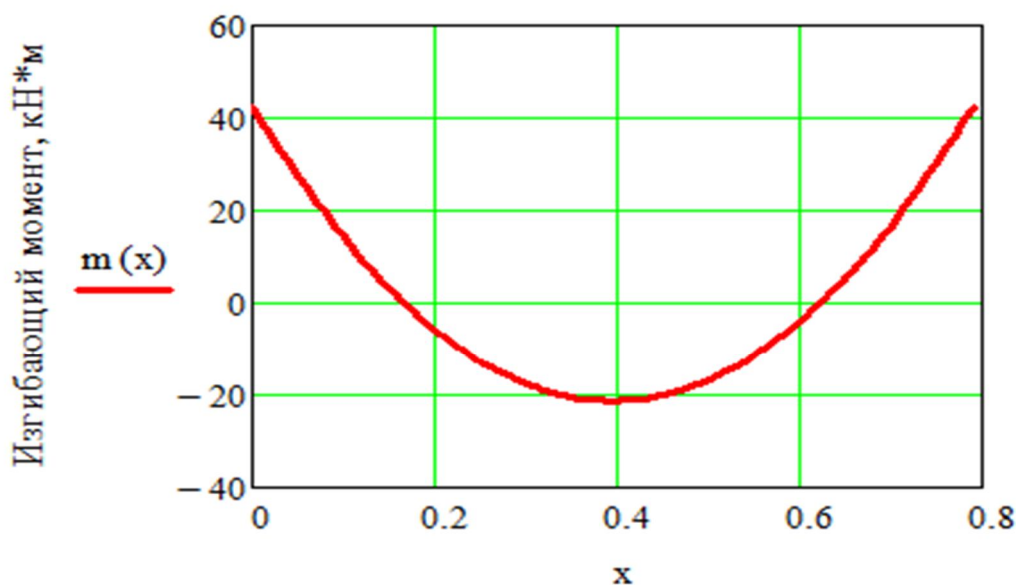
Уравнение изгибающего момента для защемленной с обеих сторон балки при равномерно распределенной нагрузке

$$M(x) = \frac{q_n * b^2}{12} - \frac{q_n * x * (b - x)}{2} \quad (19)$$

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

где  $q_n$  - приведенное суммарное давление рабочего давления и температурной реакции трубного пучка на трубную доску:  $q_n = p + q_t = 0,818$  МПа,

$x$  - координата от заземленного торца балки (см. рисунок 2).



Линейная координата балки

Рис. Изгибающий момент балки

Рисунок 2

Наибольшие значения изгибающего момента в трубной доске имеет в местах заделки в корпус. По мере смещения к центру величина изгибающего момента и изгибных напряжений снижается (см. рисунок 2).

Изгибающий момент в трубной доске в зоне крайнего ряда отверстий, отстоящего на расстоянии половины шага  $t/2$  от стенок корпуса:

$$M(t/2) = 3,3 * 10^4 \text{ Н * м} \quad (20)$$

Изгибные напряжения в трубной доске при рабочем давлении и температурных деформациях в трубном пучке в зоне крайнего ряда отверстий:

$$\sigma_{ди} = \frac{M(t/2)}{W} = 153 \text{ МПа} \quad (21)$$

где  $W$  - момент инерции пластины при ее ширине 1 м ( $W = h^2/6$ ).

Изгибные напряжения в трубной доске при рабочем давлении близки к допускаемым напряжениям для стали 20 (144 МПа), т.е. прочность трубной доски не вызывает серьезных опасений, однако напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя трубной доски в зоне перфорации создает угрозу прочности сварных швов, которые вследствие краевого эффекта испытывают значительные нагрузки [8]. Принимая во внимание необходимость включений и остановов дистиллятора для проведения периодического обслуживания, режим работы конденсаторов следует считать циклическим.

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

Напряжения сварного шва, вызванные его совместной деформацией с трубной доской, с учетом незначительных размеров шва в сравнении с толщиной трубной доски можно считать практически постоянными и нормальными к сечению шва, т.е. мембранными ( $\sigma_m$ ), и, следовательно, амплитуда мембранной составляющей напряжений  $\sigma_{ма} = \sigma_{ди}$ .

Кроме мембранных напряжений сварной шов испытывает изгибные напряжения ( $\sigma_{и}$ ), которые вызваны деформацией трубки в зоне сварного шва и согласно [4] связаны с мембранными напряжениями соотношением:

$$\sigma_{иа} = 1,82 * \sigma_{ма} = 278 \text{ МПа}$$

Для сварных соединений с неполным проплавлением, выполняемых электродами из углеродистых сталей, эффективный коэффициент концентрации [1]:

$$K_э = 3,5 + 2,8 * 10^3 * \left( \frac{\sigma_{ма}}{\sigma_{ма} + \sigma_{иа}} - 0,2 \right)^{2,5} * \left( \frac{\sigma_{ма} + \sigma_{иа}}{E} - 2000 \right) = 3,5 \quad (22)$$

Амплитуда условных упругих напряжений с учетом концентрации напряжений:

$$\sigma_a = K_э * (\sigma_{ма} + \sigma_{иа}) = 1512 \text{ МПа}$$

В соответствии с [1] коэффициент асимметрии цикловой нагрузки дистиллятора принят равным  $r = -1$ . Согласно [1] при расчете деталей, которые нагружены тепловыми и механическими нагрузками при ограничении деформации другими упругими несущими элементами и разрушение которых приводит к выходу теплоносителя за пределы несущих элементов, коэффициент запаса по напряжениям  $n_\sigma$  принимается равным 2, а коэффициент запаса по числу циклов  $n_N$  принимаются равными 10. Характеристика пластичности определена согласно [1]  $e_c = 0,346$ . Предел прочности для стали 20 при температуре до  $100^\circ\text{C}$  принят согласно [1]  $R_m = 334 \text{ МПа}$ .

При известной амплитуде условных упругих напряжений допускаемое число циклов определяется как наименьшее из двух значений, вычисленных с использованием заданного значения коэффициента запаса прочности по напряжениям и коэффициента запаса прочности по числу циклов [1 (5.25 после преобразования)]:

$$N_\sigma = \left[ \frac{E * e_c}{2 * n_\sigma * \left( \sigma_a - \frac{0,4 * R_m}{n_\sigma} \right)} \right]^2 = 126 \quad (23)$$

$$N_n = \left[ \frac{E * e_c}{2 * \sqrt{n_N} * (\sigma_a - 0,4 * R_m)} \right]^2 = 50 \quad (24)$$

Допустимое число циклов работы дистиллятора при начальной температуре охлаждающей воды  $20^\circ\text{C}$  принято равным 50, что для регламентированного периода (30 лет) безаварийной эксплуатации может оказаться недостаточным. Если при эксплуатации в зимний период будет допускаться подача охлаждающей воды в дистиллятор из внешнего открытого водоисточника с температурой воды менее  $+20^\circ\text{C}$ , то количество

циклов до разрушения сварных швов периферийных трубок существенно сократиться					Лист
15.04.01.2017.118.00 ПЗ					Лист
15.04.01.2017.118.00 ПЗ					22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

Таким образом, расчетная оценка напряженно-деформированного состояния позволяет выявить причины нарушения герметичности сварных швов трубной доски:

- под действием рабочего давления воды водяной камеры и температурной реакции трубного пучка заземленная по всему периметру трубная доска в зоне, прилегающей к стенкам корпуса, приобретает существенные изгибные напряжения в обеих плоскостях, сопоставимые или даже превышающие допустимые напряжения металла трубной доски,
- сварные швы периферийных трубок, находящиеся на поверхности трубной доски, испытывают аналогичные растягивающие мембранные напряжения по всему контуру, к которым добавляются изгибные напряжения, возникающие вследствие краевого эффекта, обусловленного механической связью между жесткой трубной доской и тонкостенной оболочкой (трубкой),
- циклический характер работы дистиллятора, суммарное воздействие мембранных и изгибных напряжений и концентрация напряжений в сварном шве создают условия для возникновения усталостных трещин задолго до окончания гарантийного срока эксплуатации аппарата.

В соответствии с изложенным предлагается для повышения продолжительности безаварийной работы дистиллятора сварные швы выполнять заглубленными на 5...6 мм или на половину толщины трубной доски.

При этом благодаря размещению в менее напряженном слое трубной доски мембранные напряжения сварных швов снизятся и составят:

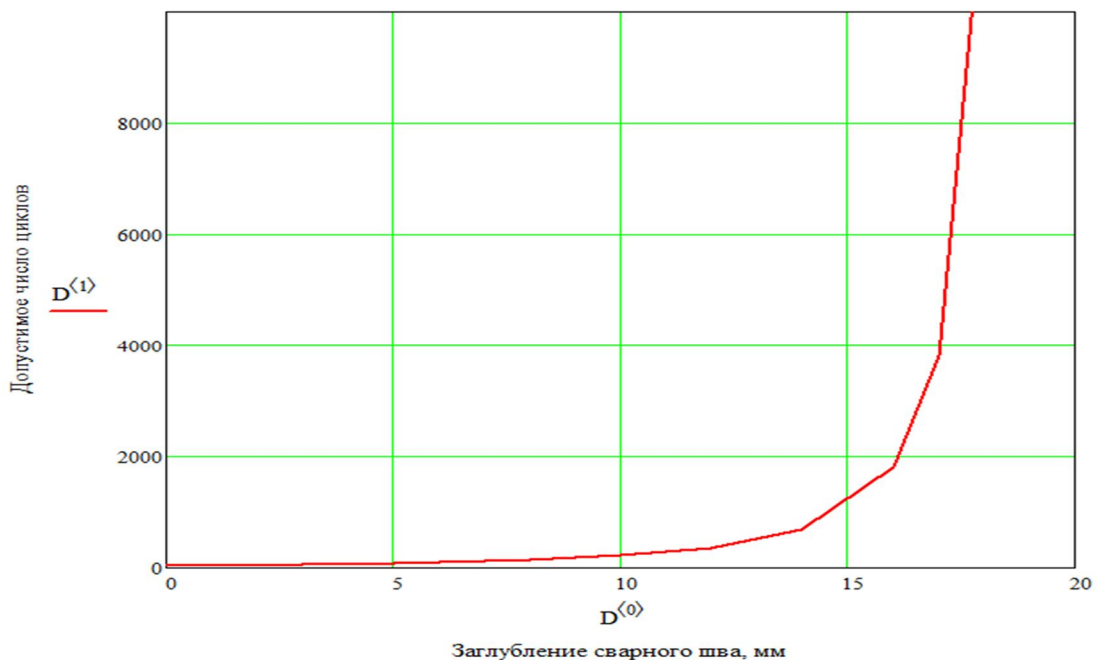
$$\sigma_{ам} = \sigma_{ди} * \left( 1 - \frac{2*s}{h} + \frac{h_{ш}}{h} \right)$$

(25)

где  $s$  - заглубление сварного шва, мм,

$h_{ш}$  - глубина проплавления сварного шва, равная толщине трубки.

Результаты расчетной оценки достигаемого снижения напряжений в сварных швах и повышения допустимого числа циклов от заглубления сварного шва представлены на рисунке 3.



Зависимость допустимого числа циклов от заглубления сварного шва

Рисунок 3

Заглубление сварного шва позволит существенно снизить или исключить полностью краевой эффект в сварных швах трубной доски, и тем самым снизить вероятность образования усталостных трещин.

#### 4 Виды сварных соединений, используемые для изготовления узла трубных досок.

Тип сварного соединения и способ сварки играет большую роль в надежности и прочности конструкции. В нашей работе главным является герметичность сварного соединения в трубной доске. Существует несколько способов соединения трубного пучка и трубной доски в трубчатых теплообменниках, также определяющих эффективность различных типов соединения:

- 1) Развальцовка или раскатывание (без канавок). Этот вид соединения (Рис. 4А) имеет ограниченное применение, так как обладает низким герметизирующим и механическим свойством.
- 2) Развальцовка или раскатывание (с канавками). Этот вид соединения (Рис. 4В) широко распространен и применяется при невысоких требованиях к герметичности и механическим свойствам. Заключается в развальцовки трубки в канавки, что повышает герметичные и механические свойства.
- 3) Развальцовка или раскатывание с герметизирующей сваркой (с канавками). Этот вид соединения (Рис 4С) с герметизирующей сваркой для увеличения герметизирующих свойств. Этот метод может быть использован для герметизации соединения (Рис 4В) при его ремонте.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.118.00 ПЗ

Лист

24

- 4) Сварка с высокой механической прочностью (без канавок). Этот вид соединения (Рис 4D) позволяет получить высокие герметизирующие и механические свойства. Обычно такой вид соединения используют, когда теплообменник подвергается высоким термомеханическим и механическим нагрузкам, где негерметичность недопустима.

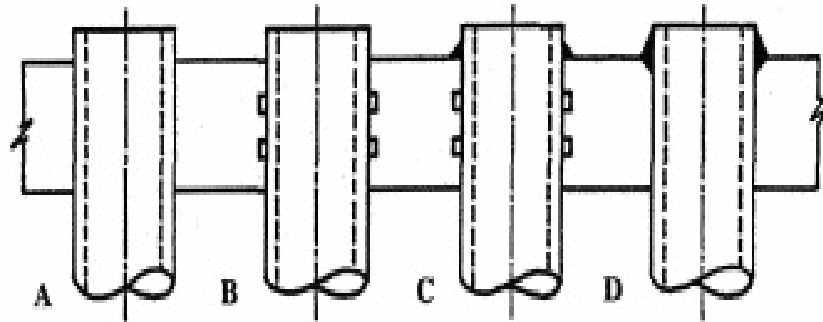


Рисунок 4

Эти типы соединений можно разделить на два вида: герметизирующая сварка и прочностная сварка.

Герметизирующая сварка – применяется для герметизации, но для обеспечения механической прочности вальцованного соединения трубки и трубной доски.

Прочностная сварка – применяется для обеспечения механической прочности, которая должна превышать или как минимум соответствовать механической прочности трубок. Зачастую применяется с глубиной разделки и катета сварного шва не менее 1,4 толщины трубки.

Выбор герметизирующей сварки в соединении трубки и трубной доски.

Существуют две причины, по которым стоит выбирать при сварке трубки и трубной доски этот способ. Во-первых, данный способ выбирается для ремонта подтекающих вальцованных соединений. Зачастую после циклических нагрузок, сварное соединение теряет свою герметичность, а повторная вальцовка может повлиять на образование новых дефектов. Во-вторых, этот вид повышает надежность узла, в сравнение с вальцовкой. Чаще всего встречается в применениях, где смешивание двух сред или утечка не допускается.

Порядок выполнения герметизирующей сварки трубки и трубной доски:

- Очистка концов трубок и отверстий в трубной доске
- Монтаж трубок
- Слабая развальцовка для обеспечения центровки и контакта
- Сваривание герметизирующей сваркой за 1 проход
- “Силовая” развальцовка в области канавок

При ремонте порядок выполнения такой же за исключением слабой развальцовки.

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

Основная проблема при сварке.

Между отверстием в трубной доске и наружной поверхностью трубки есть зона в которой скапливается конденсат, жидкость после гидростатических тестов, масло от механической обработки или жидкость после утечки. Нагрев при сварке приводит к взрывному испарению с увеличением объема скопленной жидкости. Обычно серьезных повреждений не бывает, если газы выйдут через не сваренные участки или вдоль длинной части трубки. Но если трубка достаточно сильно развальцована, то газу остается только выйти через сварной шов, а это значит, что в сварном соединении появится свищ или проделается отверстие в сварном шве, не выходящие наружу.

5 Оптимизация сварного соединения узла трубной доски (по результатам расчета напряженно – деформированного состояния).

### 5.1 Сварочные материалы.

Трубная доска – Сталь 20.

Конструкционная углеродистая качественная сталь. В целом сталь 20 находит широкое применение в котлостроении, для труб и нагревательных трубопроводов различного назначения, кроме того промышленность выпускает прутки, лист. После цементации и цианирования из этой стали можно изготавливать детали, от которых требуется высокая твердость поверхности и допускается невысокая прочность сердцевин: кулачковые валики, оси, крепежные детали, шпиндели, пальцы, звездочки, шпильки, вилки тяг и валики переключения передач, толкатели клапанов, валики масляных насосов, пальцы рессор, малонагруженные шестерни и другие детали автотракторного и сельскохозяйственного машиностроения.

Из стали 20 изготавливается богатый ассортимент проката, конечно при этом учитываются особенности стали этой марки. Так поковки из этой марки могут быть изготовлены категории прочности только 175, 195, 215, 245 при толщине поковок от 100 до 300 мм, для получения поковок с большей категорией прочностью необходимо уже использовать другую сталь. Для изготовления поковок используют блюмсы или слитки стали, катаные или кованые заготовки, либо заготовки отлитые на линии непрерывной разливки стали и какие-либо другие виды проката. Химический состав стали приведен в таблице 3.

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

Таблица 3 – Химический состав стали 20.

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As	Fe
0,17- 0,24	0,17- 0,37	0,35- 0,65	До 0,25	До 0,04	До 0,04	До 0,25	До 0,25	До 0,08	~98

Трубный пучок – сталь 12Х18Н10Т.

Сталь конструкционная криогенная. Хромоникелевая аустенитная сталь 12Х18Н10Т получила наибольшее распространение в промышленности ввиду возможности успешного использования ее в разнообразных эксплуатационных условиях. Она обладает высокой коррозионной стойкостью в ряде жидких сред, устойчива против межкристаллитной коррозии после сварочного нагрева, сравнительно мало охрупчивается в результате длительного воздействия высоких температур и может быть применена в качестве жаропрочного материала при температурах ~600° С. Будучи высокопластичной в условиях глубокого холода, эта сталь используется в установках для получения жидкого кислорода.

Сварные швы конструкций, работающих в контакте с агрессивными жидкостями, должны прежде всего обладать стойкостью против межкристаллитной коррозии.

Применяемые для электрошлаковой сварки пластинчатые электроды из горячекатаных листов содержат не менее 0,10% С. При таком содержании углерода ввиду замедленного охлаждения, характерного для электрошлаковой сварки, возможно появление склонности шва к межкристаллитной коррозии. Этому способствует также крупнокристаллическое строение металла шва.

При использовании фторидных флюсов окисление титана, содержащегося в электроде, невелико и не превышает 20%. Однако даже небольшое уменьшение концентрации титана в шве при содержании 0,1% С влечет за собой снижение коррозионной стойкости. Поэтому при электрошлаковой сварке рекомендуется применять электроды из сталей с пониженным содержанием углерода, с тем чтобы концентрация его в шве не превышала 0,08%. Если его концентрация в основном металле равна 0,12%, необходимо применять пластинчатый электрод, содержащий не более 0,03% С. Химический состав стали приведен в таблице 4.

Таблица 4 – Химический состав стали 12Х18Н10Т.

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As	Fe
До 0,12	До 0,8	До 2	9-11	До 0,02	До 0,035	17-19	До 0,03	0,4-1	~67



## 5.2 Вариант с ручной дуговой сваркой

Сталь 20 и сталь 12X18Н10Т без проблем свариваются с помощью ручной дуговой сварки. При сварке встык трубной доски и трубки малого диаметра необходимо оставлять зазор для того, чтобы было видно, где варить. Существует вариант с увеличением тока, но при этом зазор быть не должно.

Применяемый электрод – ЦТ-26. Электрод, применяемый для нержавеющей стали. Предназначен для сварки паропроводов. Наплавленный металл в исходном состоянии (без термообработки) стоек к межкристаллической коррозии. Толщина электрода – 3 мм (см. рисунок 5).



Рисунок 5

Сварочное оборудование “Patriot 210DC” (см. рисунок 6).

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28



Рисунок 6

Характеристики оборудования:

Тип устройства – сварочный инвертор;

Типы сварки – ручная дуговая сварка (ММА);

Сварочный ток – 10-180А;

Количество фаз питания – 1 фаза;

Напряжение холостого хода – 80В;

Тип выходного тока – постоянный;

Рабочее напряжение – 26,5 В;

Мощность – 4,4кВт;

Продолжительность включения при максимальном токе – 50%;

Толщина металла – 2-5 мм.

Этот способ сварки дешев и легкодоступен. Однако, у сварных швов высокие требования по герметичности, а это значит, что у сварщика должен быть как минимум 5 разряд. Да и человеческий фактор играют важную роль, провести ровно по контуру трубы достаточно непростая задача.

В целом, с точки зрения экономии денежных средств ручная дуговая сварка отличный вариант, но учитывая, что в нашей выпускной квалификационной работе трубная доска находится в напряженно-деформированном состоянии и единственный способ от него

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

избавиться, это заглубить сварной шов. Ручной дуговой сваркой сварить трубу малого диаметра с заглубленным швом без дефектов не получится.

### 5.3 Вариант с автоматической орбитальной сваркой.

В химической и энергетической промышленности часто возникают задачи разработки технологий автоматической сварки соединений типа «труба – трубная доска». Для этих целей используется оборудование для автоматической орбитальной сварки.

Для заглубленного сварного шва в трубной доске необходима специальная сварочная головка. Примером для выполнения данного вида сварки можно взять установку ОСА-ПА предназначенной для автоматической сварки труб в трубные доски проволокой сплошного сечения в среде активных и защитных газов. Установка ОСА-ПА показана на рисунке 7.



Рисунок 7

Функциональные возможности установки:

- Сварка может производиться как с разделкой стыка, так и без его разделки.
- Установка используется для вварки труб из низколегированных конструкционных сталей, легированных коррозионно-стойких сталей.
- Высокая скорость сварки (в 4 раза выше, чем аргонодуговая сварка).
- Невысокие требования к допускам при сборке заготовок.
- Позволяет вести сварку в горизонтальной и вертикальной плоскостях.
- Высокое качество сварочного шва

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

Технические характеристики установки ОСА-ПА приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Технические характеристики ОСА-ПА

Диапазон диаметров ввариваемых труб, мм	20 - 80
Скорость вращения сварочной горелки, об/мин	0 - 5.7
Скорость подачи электродной проволоки, м/мин	0 - 12
Диаметр электродной проволоки, мм	0,8; 1,0; 1,2
Габаритные размеры, мм	545 x 182 x 229
головки	280 x 197 x 278
блока управления источника	610x280x535
Масса, кг, не более	
головки	8
блока управления	5
источника	44
Диапазон рабочих температур, С	От - 40 до + 40
Масса, кг	29
Габаритные размеры, мм	505x225x435

Крепление сварочной головки.

Крепление сварочной головки за внутреннюю поверхность трубы осуществляется при помощи цангового зажима.

Переналадка на различные диаметры труб осуществляется сменными цангами.

Имеет катушку и механизм подачи сварочной проволоки .

Оснащена приводом вращения и механизмом позиционирования горелки относительно сварочного стыка.

Блок управления с пультом дистанционного управления предназначен для выставления режимов работы сварочной головки.

- Плавная регулировка скорости вращения сварочной головки.
- Плавная регулировка скорости подачи сварочной проволоки.
- Плавная регулировка величины перекрытия сварочного шва.
- Плавная регулировка времени гашения дуги.

Пульт дистанционного управления служит для управления процессом сварки

Сварочный источник DC 400.33 - это современный мощный 400-амперный инверторный источник питания для сварки плавящимся электродом в среде защитных

	газов (см. рисунок §).								Лист
									31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

15.04.01.2017.118.00 ПЗ



- Дистанционное управление напряжением сварки.
- Цифровая индикация тока и напряжения сварки.
- Питание как от стационарной сети так и от дизель-генератора.
- Переключение режимов:
  - сварка самозащитной порошковой проволокой типа «Innershield»
  - сварка газозащитной проволокой сплошного сечения и порошковой проволокой.
- Регулируемое время «горячего старта», от 0 до 2 секунд. Необходимо для улучшения зажигания сварочной дуги и формирования качественного начала шва.

Рисунок 8

Технические характеристики ДС 400.33 приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Технические характеристики ДС400.33

Напряжение питания, В	380
Потребляемая мощность, кВА, не более	20
Напряжение источника (плавнорегулируемое), В	16-32
Максимальный ток при ПН=100 %, А (+20С)	400
Масса, кг, не более	44

Примеры сварки труб с помощью установки ОСА-ПА приведены на рисунках 9 и 10.



Рисунок 9



Рисунок 10

Более сложные и узкоспециализированные задачи в области сварки представляют собой соединения типа «труба-трубная доска» в закрытой камере (см. рисунок 11).



Рисунок 11

Данное соединение характеризуется следующими особенностями:

- подвод сварочного инструмента к месту сварки происходит через специальные технологические отверстия, размеры которого конструкторы стараются минимизировать;
- позиционирование электрода относительно стыка выполняется оператором «в слепую»;
- ограниченный контроль процесса формирования шва в период сварочного цикла и, как следствие, отсутствие возможностей оператором вводить коррективы в процессе сварки.

Выполнение подобных сварных соединений включают следующие технологические операции:

- механическую зачистку, обезжиривание труб и трубной доски;
- установку труб в трубной доске;
- развальцовку труб в трубной доске для обеспечения «нулевого» зазора;
- фрезерную операция для обеспечения одинакового вылета труб относительно трубной доски;
- сварку соединения типа «труба-трубная доска».

Решение данной задачи в закрытой камере может осуществляться по двум направлениям:

1. Разработка технологического комплекса, позволяющего реализовать все перечисленные технологические операции на базе одного интегрированного управляющего модуля.

2. Разработка сварочного комплекса, который позволил бы выполнить сварку соединения в рамках существующей технологии изготовления конструкции.

Решение задачи по первому направлению связано со следующими трудностями:

- необходимость координации работы специалистов из разных областей (обработка резанием, обработка давлением, сварка);
- высокие требования к квалификации обслуживающего персонала;
- ограниченная возможность разделения процесса изготовления по принципу «этап отработки технологии – этап производства», когда высококвалифицированные специалисты используются в основном на этапе отработки технологии.
- высокая вероятность необходимости изменения всей технологии изготовления изделия, так как одновременно требуется автоматизация в трех направлениях: обработка резанием, вальцовка, сварка.

Фирмой Polysoude S.A.S., для решения данной задачи разработан сварочный комплекс на базе источника сварочного тока PS 406 или источников серии PC со сварочной головкой TS 2000 AVC и сварочным инструментом Hudson Lanze.

Данный комплекс характеризуется следующими отличительными признаками:

- Максимальное использование оборудования и комплектующих из стандартной линейки продуктов фирмы Polysoude S.A.S. Специализированным является только сварочный инструмент Hudson Lanze (см. рисунок 12), который разрабатывается непосредственно под заявленную задачу. Использование оборудования из стандартной линейки продуктов позволяет путем незначительного дооснащения расширить спектр решаемых задач в области орбитальной сварки.



Рисунок 12

- Сравнительно простая адаптация существующей технологии под данный комплекс. Так как для его применения, кроме стандартного требования механической зачистки от окалины и обезжиривания, необходимо обеспечить нулевой зазор или переходную посадку между трубой и трубной доской и совпадение торца трубы с плоскостью трубной доски («заподлицо»). Причем выполнение сборки «заподлицо»

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35



требуется для каждого соединения в отдельности, а не для формирования «единого уровня» для всей трубной доски.

- Возможность сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов с присадочной проволокой. Присадочная проволока позволяет «смягчить» требования к качеству сборки, и расширить диапазон марок свариваемых материалов.

Сварочные операции при использовании сварочного комплекса фирмы Polysoude S.A.S. осуществляются в следующей последовательности.

Оператор через технологическое отверстие подводит электрод к соединению «труба – трубная доска». Предварительная настройка с помощью адаптера (см. рисунок 12) расстояния между стенками камеры препятствует контакту электрода со стенкой путем удара, что позволяет избежать непроизвольной поломки элементов сварочного инструмента (см. рисунок. 13). Центрирование электрода обеспечивается за счет центрирующего дорна (см. рисунок 13).



Рисунок 13

Оператор после установки и фиксации Hudson Lanze в «закрытой камере» дает команду на запуск предварительно отработанной и сохраненной сварочной программы. Во время выполнения сварочной программы сварочный комплекс в автоматическом режиме коснется электродом трубной доски, отступит им на заданное расстояние и запустит сварочный цикл.

В процессе сварки активизированная в сварочной программе функция AVC (Автоматическая регулировка напряжения дуги) позволит стабилизировать сварочные параметры и уменьшить негативное влияние погрешностей сборки, возникших на предварительных этапах.

Данный комплекс успешно зарекомендовал себя на следующих предприятиях: Namon D’Hont (Франция), D’Hont (Бельгия), Skoda, Envig Bronswerk, Excon Stell (Чешская республика) Famet, Azomet (Польша), Hyundai (Южная Корея) Envig Bronswerk

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

(Нидерланды), EG Contracting Engineering Co LTD (Венгрия), Scholler Bleckmann Nooter, Enco – Energie Componenten GmbH (Австрия), ОАО «ЗИО - Подольск», ОАО «Борхиммаш» (Россия).

В связи с высокой конкуренцией, которая наблюдается сегодня между производителями энергетического и химического оборудования, фирма Polysoude S.A.S. считает рынок подобных сварочных комплексов перспективным и имеющим тенденцию к стабильному росту. Являясь ведущим в мире производителем оборудования для орбитальной сварки, фирма предлагает совместно с потенциальными клиентами решать технологические задачи в этой узкой области и обеспечивает подготовку специалистов соответствующего профиля.

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе были проведены исследования и математические расчеты в программе MathCAD. Данная работа позволила выявить максимальные изгибные напряжения в трубной системе конденсатора, которые подвергали деформации конструкцию, вследствие чего, образовывались усталостные трещины в сварном соединении.

Была выявлена зависимость, в которой при заглублении сварного шва к центру трубной доски изгибные напряжения уменьшались бы в геометрической прогрессии, что увеличивало бы количество рабочих циклов промышленного дистиллятора до тысяч раз. Если построить эпюру параллельно трубной доске, то можно наглядно показать, что в так называемом “условном нуле” (середина трубной доски) изгибных напряжений будет минимум (см. рисунок 14).

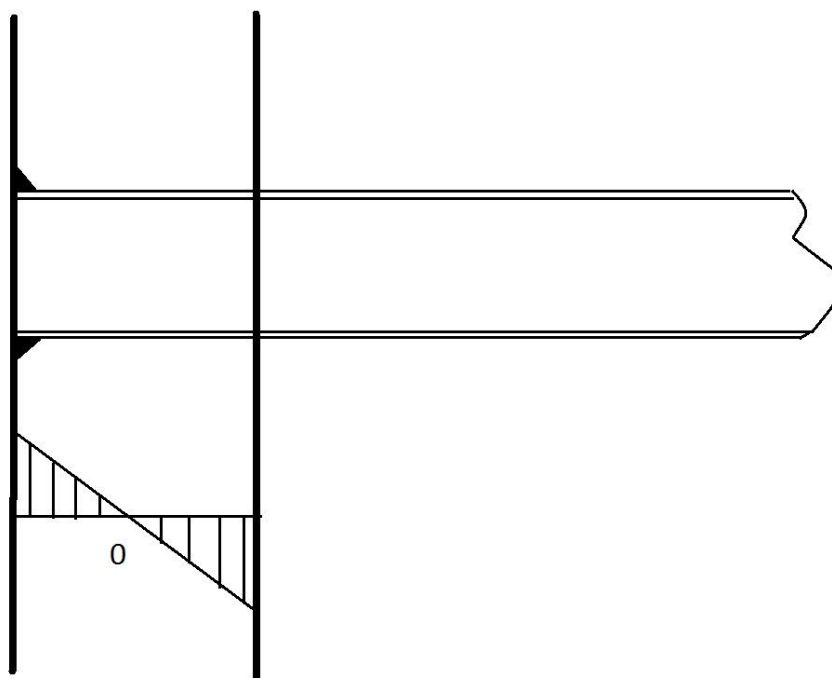


Рисунок 14

Максимальные напряжения будут на краях трубной доски. Чем ближе сварной шов будет находиться к середине трубной доски, тем большее количество циклов мы сможем получить в итоге.

Стоит отметить, что человеческие и природные факторы никто не отменял, поэтому кроме профилактических остановок, зачастую возникают экстренные - ремонтные остановки дистиллятора. А ввиду того что, мы имеем, в исходном значении, ограниченное число циклов за весь срок эксплуатации (а это в среднем 2 цикла в год), заглубление сварного шва придет экономии денежных средств, связанных с затратами на ремонт и в последствие приобретением нового оборудования, если у старого закончится срок эксплуатации.

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. С. П. ТИМОШЕНКО и С. ВОЙНОВСКИЙ-КРИГЕР ПЛАСТИНКИ и ОБОЛОЧКИ ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, СТЕРЕОТИПНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» МОСКВА 1966
2. Д. В. ВАЙНБЕРГ, Е. Д. ВАЙНБЕРГ. Расчет пластин. Издание второе, переработанное и дополненное ИЗДАТЕЛЬСТВО «БУДІВЕЛЬНИК» Киев — 1970
3. Григолюк Э.И., Фильштинский Л.А. Перфорированные пластины и оборочки, М.: Наука. 1970. - 556 стр. с илл.
4. ТИМОШЕНКО С. П., ЛЕССЕЛЬС Дж. ПРИКЛАДНАЯ ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ Перевод с английского инж.-мех. А. И. ДЫМОВА ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ. Государственное техническое издательство Ленинград-1931.с. 391 стр. с илл.
5. ПНАЭГ-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок
6. ГОСТ Р 52857.1-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования.
7. РД 10-249-98 Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды
8. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. – М.: Наука. 1979. – 560 с.
9. НП-068-05 Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования
10. РД 10-249-98 Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды
11. Виноградов С. Н. Конструирование и расчет элементов тонкостенных сосудов: Учеб. по-собие / С. Н. Виноградов, К. В. Таранцев. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 136 с.: 44 ил., 3 табл., библиогр. 22 назв.
12. Партуфина И.В. Малоцикловая усталость элементов металлических конструкций при нерегулярном нагружении: Диссертация. – Москва, 1984.
13. Якуткин Е.Г. Обеспечение качества поверхностного слоя соединений труба-коллектор, труба - трубная доска теплообменного оборудования атомных установок с учетом технологической наследственности при их изготовлении: Автореферат/Диссертация. – Москва, 2015.
14. Исмагилов А.З, Четверткова О.В. Оценка напряженно-деформированного состояния трубной решетки теплообменника: Статья.- Москва, 2013.
15. Донбасская государственная машиностроительная академия Усталость сварных конструкций. Рекомендации по повышению выносливости и расчету на

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

долговечность сварных узлов подъемно-транспортных и горнорудных машин:  
Электронное методическое пособие. - Краматорск, 2016.

16. Целищев М.Ф. Напряженно-деформированное состояние элементов трубных систем кожухотрубных теплообменных аппаратов паротурбинных установок: Автореферат/Диссертация. – Екатеринбург, 2008.- 138с.

					15.04.01.2017.118.00 ПЗ	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		