

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Факультет химических технологий, промышленной экологии и биотехнологий  
Кафедра «Оборудование и автоматизация химических производств»  
Направление подготовки: 15.04.02 Технологические машины и оборудование  
Направленность (профиль) образовательной программы: Машины, аппараты химических производств и нефтегазопереработки

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (магистерская диссертация)

На тему Исследование гидродинамики аппарата с подвижной насадкой и  
реконструкция блока сероочистки ГФУ ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез»

Студент гр. МАХП-18-1м \_\_\_\_\_ ( Д.А.Иванцов )

Состав ВКР:

1. Пояснительная записка на 83 стр.
2. Графическая часть на 7 листах

Допускается к защите  
Заведующий кафедрой  
д-р техн. наук, профессор  
\_\_\_\_\_ Е.Р.Мошев  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Руководитель ВКР  
\_\_\_\_\_ ( А.Г.Хлуденев )

Консультант:  
\_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ )

Регистрационный номер \_\_\_\_\_

Пермь 2020

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»  
Кафедра «Оборудование и автоматизация химических производств»

**УТВЕРЖДАЮ**

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ Е.Р.Мошев  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение выпускной квалификационной работы

Фамилия, И.О. Иванцов Денис Андреевич

Факультет Химико-технологический Группа МАХП-18-1м

Начало выполнения работы \_\_\_\_\_

Контрольные сроки просмотра работы кафедрой еженедельно

Сроки представления на рецензию 16.06.2020

Защита работы на заседании ГЭК 23.06.2020

1. Наименование темы Исследование гидродинамики аппарата с подвижной насадкой  
и реконструкция блока сероочистки ГФУ ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез»

2. Исходные данные к работе Материалы производственной и преддипломной практик

3. Содержание пояснительной записки \_\_\_\_\_

а) основная часть (конструкторская, технологическая, исследовательская) \_\_\_\_\_

Литературный обзор аппаратов с подвижной насадкой

Экспериментальная часть. Исследование гидродинамических характеристик аппарата с  
подвижной кольцевой насадкой

б) раздел Технологические расчеты АПН для моноэтаноламиновой очистки газа от  
сероводорода

в) раздел Прочностные расчеты

---

---

---

г) раздел Приложение А. Графическая часть проекта

---

---

---

д) раздел Приложение Б. Статья «Совершенствование аппаратного оформления процесса моноэтаноламиновой очистки жирного газа в ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» с применением аппаратов с подвижной насадкой», Вестник ПНИПУ «Химическая технология и биотехнология», № 3, 2019

---

---

---

е) раздел \_\_\_\_\_

---

---

---

4. Дополнительные указания Предусмотреть оснащение проектируемого АПН эффективными каплеуловителем и оросителем

---

---

---

5. Основная литература
1. Замян А.А., Рамм В.М. Абсорберы с псевдоожиженной насадкой. М.: Химия, 1976-187 с.
  2. Интенсивные колонные аппараты для обработки газов жидкостями / под ред. Тарата. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1976 – 240 с.
  3. ГОСТ 14289-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.- М.-Л.:Изд-во стандартов, 1989.
  4. Технологический регламент ГФУ, ТР 21-056-2016. 169 с.
  5. Головачевский Ю.А. Оросители и форсунки скрубберов химической промышленности. М., «Машиностроение», 1974-271 с.
- 
- 
- 

Руководитель выпускной квалификационной работы магистра

Доцент кафедры ОАХП, канд. техн. наук (А.Г.Хлуденев)  
(должность, Ф.И.О.)

Консультант \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_)  
(должность, Ф.И.О.)

Задание получил \_\_\_\_\_ (Д.А.Иванцов)  
(дата и подпись студента)

**КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ  
ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

№п.п.		Объем этапа, в %	Сроки выполнения		Примечание
			начало	конец	
1	Разработка основных разделов диссертации	50	27.04.2020	17.05.2020	
2	Оформление диссертации	20	18.05.2020	25.05.2020	
3	Разработка и оформление иллюстративной материала к защите диссертации	10	25.05.2020	06.06.2020	
4	Представление диссертации на проверку и отзыв научного руководителя	5	07.06.2020	10.06.2020	
5	Представление работы заведующему кафедрой	3	11.06.2020	15.05.2020	
6	Защита на заседании ГЭК	2	23.06.2020	23.06.2020	

Научный руководитель работы \_\_\_\_\_ (А.Г.Хлуденев)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 93 с., 17 рис., 8 табл., 22 источника, 2 прил.

АБСОРБЕР С ПОДВИЖНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ НАСАДКОЙ (АПН), МОНО-ЭТАНОЛАМИНОВАЯ ОЧИСТКА, ТРЕХФАЗНЫЙ ПСЕВДООЖИЖЕННЫЙ СЛОЙ, КОЭФФИЦИЕНТ РАСШИРЕНИЯ СЛОЯ, ПОВЕРХНОСТЬ КОНТАКТА ФАЗ, СКОРОСТЬ РАЗВИТОГО ВЗВЕШИВАНИЯ.

Объект проектирования – установка моноэтаноламиновой очистки жирного газа КК-1 и АВТ от сероводорода.

Цель работы – совершенствование аппаратного оформления процесса МЭА очистки, повышение его эффективности и интенсивности, заключающегося в замене двух существующих абсорберов (тарельчатый и насадочный) одним высокоэффективным аппаратом с подвижной насадкой.

В работе представлены результаты экспериментального исследования некоторых гидродинамических характеристик АПН с кольцевой насадкой (скорость развитого псевдооживления, гидравлическое сопротивление слоя, степень расширения слоя).

С использованием результатов исследования выполнены технологические расчеты АПН, включающие расчет основных массообменных характеристик аппарата, определение количества слоев насадки, гидравлическое сопротивление аппарата.

Предложена конструкция встроенного центробежного каплеуловителя.

Выполнены прочностные расчеты АПН.

Графическая часть работы представлена на 7 листах.

## Содержание

Введение.....	9
<b>1 Литературный обзор.....</b>	<b>10</b>
1.1 Принцип работы и назначение аппаратов с подвижной насадкой.....	10
1.2 Классификация аппаратов с подвижной насадкой .....	12
1.3 Сравнение АПН с аппаратами других типов .....	21
1.4 Требования, предъявляемые к насадочным телам .....	22
1.5 Цель работы .....	22
<b>2 Экспериментальная часть .....</b>	<b>23</b>
2.1.1 Описание экспериментальной установки.....	24
2.1.2 Анализ результатов эксперимента .....	24
2.1.3 Обработка экспериментальных данных .....	29
2.1.4 Математическое планирование эксперимента .....	33
<b>3 Технологический расчет колоны .....</b>	<b>40</b>
3.1 Выбор основных параметров АПН .....	40
3.2 Определение диаметра аппарата .....	40
3.3 Определение коэффициента массопередачи .....	41
3.4 Расчет коэффициента извлечения .....	42
3.5 Расчет гидравлического сопротивления АПН .....	42
3.6 Расчет гидравлического сопротивления каплеуловителя .....	45
3.7 Расчет диаметров штуцеров .....	45
3.8 Расчет диаметра каплеуловителя .....	46
3.9 Ороситель .....	46
<b>4 Прочностной расчет колоны .....</b>	<b>47</b>
4.1 Исходные данные для механического расчета .....	47
4.2 Конструктивный расчет колоны .....	47
4.2.1 Определение высоты аппарата .....	47
4.2.2 Определение числа обслуживающих площадок .....	48
4.3 Расчет на прочность конструктивных элементов колоны .....	48

4.3.1	Расчет корпуса колоны на прочность .....	48
4.3.2	Определение допускаемого давления при принятой толщине стенки ..	48
4.3.3	Расчет днища корпуса на прочность .....	49
4.3.4	Подбор днища корпуса .....	49
4.4	Определение весовых характеристик колоны .....	50
4.4.1	Определение массы корпуса колоны .....	50
4.4.2	Определение насадок .....	50
4.4.3	Определение массы каплеуловителя .....	50
4.4.4	Определение массы опоры .....	50
4.4.5	Определение массы обслуживающих площадок .....	51
4.4.6	Определение массы воды при гидроиспытании .....	51
4.4.7	Определение максимальной массы аппарата .....	51
4.4.8	Определение минимальной массы аппарата .....	51
4.5	Определение расчетных усилий колонного аппарата от ветровых нагрузок .....	52
4.5.1	При рабочих условиях .....	52
4.5.2	Определение периода собственных колебаний .....	52
4.5.3	Определение средней составляющей ветровой нагрузки .....	54
4.5.4	Коэффициент пульсации давления ветра для середины k-го участка ....	54
4.5.5	Пульсационная составляющая ветровой нагрузки на i-ом участке .....	56
4.6	Выбор опор .....	57
4.7	Прочностной расчет колонного аппарата .....	58
4.7.1	Корпус колонного аппарата .....	58
4.7.2	Проверка прочности корпуса аппарата при рабочем условии.....	58
4.7.3	Проверка прочности корпуса аппарата при условии монтажа .....	60
4.7.4	Опорная обечайка .....	62
4.7.5	Проверка прочности обечайки при рабочем условии .....	62
4.7.6	Проверка прочности аппарата при условии монтажа .....	63
4.7.7	Опорная обечайка .....	64
4.7.8	Расчет и укрепление отверстий в корпусе колоны .....	65

4.7.9 Проверка прочности сварного шва .....	65
4.8 Выбор конструкции фланца .....	67
4.9 Болтовая нагрузка в условиях монтажа .....	69
4.9.1 Условие прочности болтов .....	71
4.9.2 Условие прочности неметаллических прокладок .....	71
4.9.3 Условие прочности втулки фланца, ограниченное сечением $s_1$ .....	71
4.9.4 Условие прочности втулки фланца, ограниченное сечением $s_0$ .....	71
4.9.5 Условие прочности .....	72
4.9.6 Требование к углу поворота .....	72
Заключение .....	73
Список использованных источников .....	74
Приложение А. Графическая часть .....	76



## Введение

Процесс хемосорбции сероводорода раствором моноэтаноламином (МЭА) из жирного газа, поступающего с каталитического крекинга КК-1 и установок АВТ, осуществляется в двух последовательно установленных по ходу газа абсорберах К-1 и А-1 (Рисунок 1).

Абсорбер К-1 имеет отбойную тарелку и шесть тарелок желобчатого типа. Нижняя часть абсорбера является сепаратором для отделения из газа конденсата.

Абсорбер А-1 состоит из трех слоев насадки (кольца Рашига) высотой два метра каждый.

Раствор МЭА (абсорбент) подается в А-1 по трем вводам на каждый слой насадок, а в К-1 – по одному вводу на верхнюю тарелку.

Диаметр обоих абсорберов – 2000 мм.

Недостатками существующей схемы являются сложность аппаратного оформления процесса, низкая интенсивность и, как следствие, громоздкость и высокая металлоемкость оборудования, а также высокая чувствительность к изменению нагрузок по газу и жидкости.

Указанных недостатков лишены аппараты с подвижной насадкой (АПН).

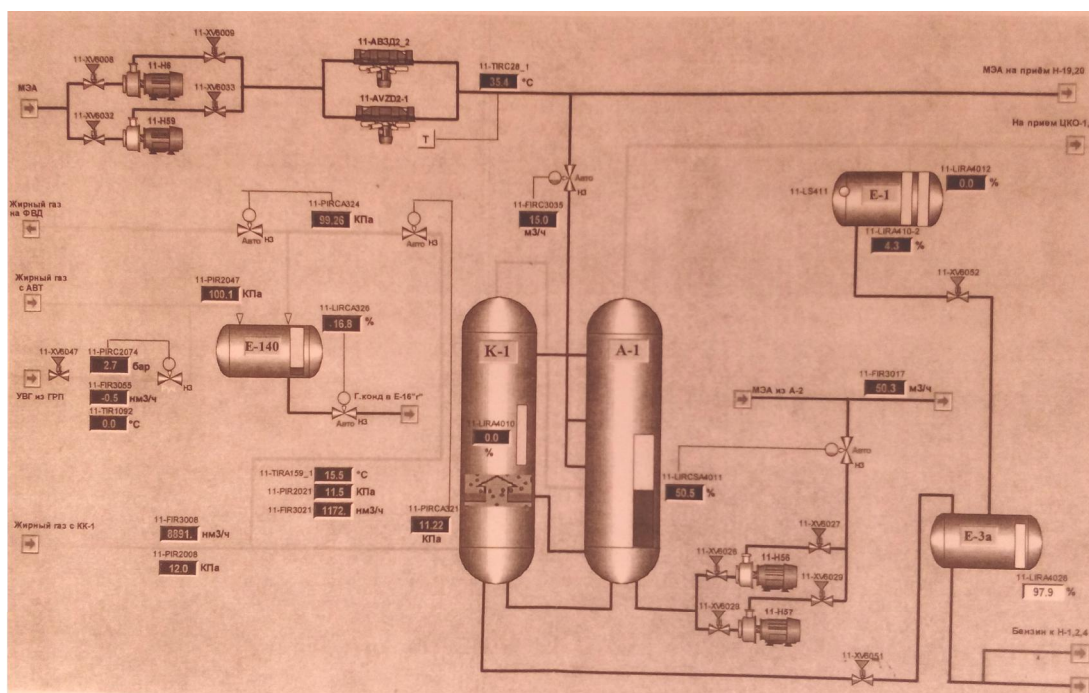


Рисунок 1. Существующая технологическая схема очистки жирного газа от  $H_2S$  установок КК-1 и АВТ раствором МЭА

Абсорберы с псевдооживленной насадкой широко применяются для очистки отходящих промышленных газов. Эти абсорберы с использованием принципа взаимодействий газожидкостных потоков в слое подвижных тел, предоставляют возможность без увеличения общего числа аппаратов проводить наиболее глубокую очистку газа от вредных компонентов. В качестве насадок для АПН применяются насадочные тела различной формы, изготовленные из материалов, устойчивых к агрессивному воздействию сред. Насадочные тела должны обеспечивать хороший контакт между жидкостью и газом, иметь сравнительно низкое сопротивление и псевдооживляться в относительно широком диапазоне изменения характеристик процесса абсорбции.

Целью диссертационной работы является теоретическая разработка и экспериментальное обоснование решений, направленных на повышение эффективности и надежности аппаратного оформления процесса МЭА очистки газов с применением аппаратов с подвижной кольцевой насадкой (АПКН).

Указанная цель достигается решением следующих задач:

- исследование основных гидродинамических характеристик АПКН;
- разработка практических рекомендаций по оптимизации функционирования аппаратов с подвижной кольцевой насадкой;
- применение результатов исследования для аппаратного оформления процесса моноэтаноловой очистки газа от сероводорода.

## **1 Литературный обзор**

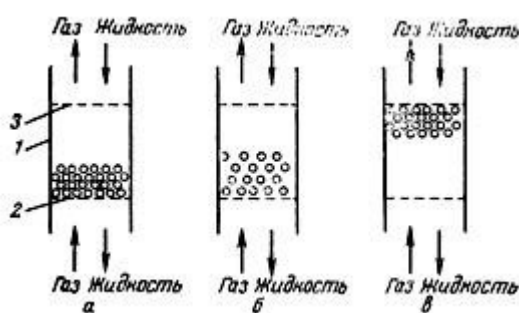
### **1.1 Принцип работы и назначение аппаратов с подвижной насадкой**

В аппаратах с подвижной насадкой увеличение эффективности процессов массообмена обеспечивается псевдооживленными насадочными телами. Насадки (кольца, куски, шары и др.) удерживаются в подвешенном состоянии с помощью потока газа, перемещающийся снизу-вверх. Жидкость, орошающая насадку, в зависимости от режима работы аппарата создает пленку, закрывающую поверхность насадочных тел, или, в более насыщенных режимах, включается в состав барботажного газожидкостного слоя (в жидкости газ распределен в виде пузырьков и т.п.), либо нахо-

дится в виде струй и капель, распределенных в газе. Для обеспечения псевдооживленного слоя насадочных тел в рабочей зоне аппарата применяют различные способы. Существуют два основных способа работы аппаратов с псевдооживленной насадкой:

- подъемной силой потока газа к верхней решетке прижимается насадка, под воздействием орошения расширяется, создавая при этом под ограничительной решеткой плавающий слой;
- под действием газа насадка расширяется, образуя взвешенный слой, где происходит связь между газом и жидкостью.

Принцип работы аппаратов с псевдооживленной насадкой показан на рисунке 2.



**Рисунок 2. Схема псевдооживления в АПН: а – критическая скорость псевдооживления выше скорости газа; б – работа в режиме турбулентно-контактного слоя (обычно псевдооживление); в – режим плавающего слоя; 1 – секция абсорбера; 2 – опорно-распределительная решетка; 3 – ограничительная решетка.**

Абсорбер произвольной формы (цилиндр, параллелепипед, конус и др.) разделен поперечными газораспределительными решетками на секции. На решетки помещается насадка из элементов определенной формы. Нижняя решетка называется опорно-распределительной и служит для предотвращения провала элементов насадочных тел, а верхняя – ограничительная – блокирует вынос насадки за пределы слоя. В аппаратах может находиться несколько секций: в этом случае часть опорно-распределительных решеток выступает в качестве ограничительных решеток для нижележащих секций.

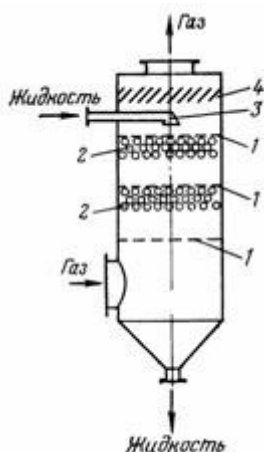
Для некоторой скорости газа насадка будет находиться в неподвижном состоянии (рисунок 2, а). Если при параллельной подаче орошающей жидкости в аппарат увеличивать постепенно расход газа, насадка перейдет в псевдооживленное состояние (рисунок 2, б). При этом каждой скорости газа соответствует определенная

высота псевдооживленного слоя. При дальнейшем увеличении скорости газа в зависимости от начальной высоты неподвижного слоя насадка может сдвинуться (прижаться) к верхней решетке, при этом создается «плавающий» слой псевдооживленной насадки (рисунок 2, в).

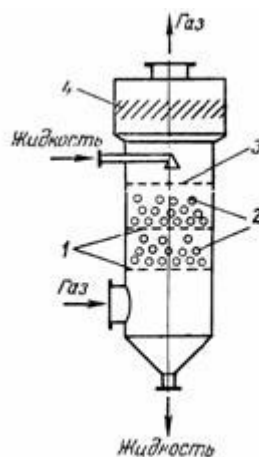
### 1.1 Классификация аппаратов с подвижной насадкой

Ниже приведен ряд конструкций абсорберов, отличающихся способами отвода и подачи жидкости, принципом работы и формой рабочей зоны аппарата [1-10].

*Абсорбер с псевдооживленной насадкой плавающего типа* – один из первых, который нашел промышленное применение. На рисунке 3.1 изображен двухсекционный абсорбер с плавающей насадкой. Абсорбер оборудован тремя одинаковыми решетками большого свободного сечения, между которыми расположены два слоя насадочных тел. Высота насадки в секциях составляет  $\frac{1}{2}$  расстояния между граничащими решетками. После расширения насадка прижимается к верхним решеткам, где под действием орошающей жидкости, поступающей сверху, прижатый слой насадки увеличивается, образуя плавающий псевдооживленный слой.



**Рисунок 3.1. Абсорбер с плавающей насадкой: 1 – ограничительная решетка; 2 – шаровая насадка; 3 – ороситель; 4 – брызгоуловитель.**



**Рисунок 3.2. Абсорбер с псевдоожиженной насадкой: 1 – опорно-распределительные решетки; 2 – шаровая насадка; 3 – ограничительная решетка; 4 – брызгоуловитель.**

Особенностью орошаемого псевдоожиженного слоя, полученного таким способом, является то, что в данном случае отрицательные эффекты отсутствуют («газовые пробки», «поршневой режим»). Это обусловлено равномерностью псевдоожижения во всем слое и, как следствие, тесным контактом жидкости и газа.

Для достижения интенсивного движения насадочных тел внутри псевдоожиженного слоя верхние решетки абсорбера устанавливают изогнутой формы. Брызгоуловитель устанавливают в верхней части абсорбера. Для создания плавающего слоя могут быть использованы шары диаметром 7-76 мм и плотностью 20 – 400 кг/м<sup>3</sup>.

Аппараты с псевдоожиженной насадкой плавающего типа рекомендуются для процессов массообмена и пылеулавливания.

*Абсорбер с псевдоожиженной насадкой.* Абсорбер с псевдоожиженной насадкой (АПН) показан на рисунке 3.2. В аппарате существует один или несколько слоев насадки, размещенных на опорно-распределительных решетках. Ограничительная решетка с большим живым сечением находится в верхней части абсорбера, она предотвращает вынос насадки газом из абсорбера. Насадка может псевдоожижаться, не прилипая к ограничительной решетке при варьировании скорости газа в широком диапазоне, что объясняется большим пространством между решетками (высота статической насадки составляет в пределах 0,1-0,2 от высоты секции). Так как скорость газа при работе аппарата достигает 6 м/с, то насадочные тела находятся в виде очень сильно разреженного слоя. В качестве насадки используют шары из пластмасс

плотностью 10-900 кг/м<sup>3</sup> и диаметром до 100 мм. Скорость газа в аппарате может варьироваться 1,5-9 м/с, плотность орошения 5-200 м/ч.

Абсорбер с кипящими «зажатыми» слоями используется для процессов массо- и теплообмена, а также очистке газов. В конструктивном исполнении схож с аппаратом на рисунке 3.1. Абсорбер функционирует при расходах газа и жидкости, обеспечивающих заполнение насадкой всего объема секции без образования плотного плавающего псевдооживленного слоя. По принципу действия абсорбер данного типа соответствует абсорберу, занимающему граничное положение между турбулентно-контактным абсорбером и абсорбером с плавающей насадкой.

Абсорбер с псевдооживленной насадкой и прямоточной подачей фаз (снизу вверх). На рисунке 4 показан аппарат с подачей жидкости под решетку (рисунок 4, а) или на некотором расстоянии от нее (рисунок 4, б).

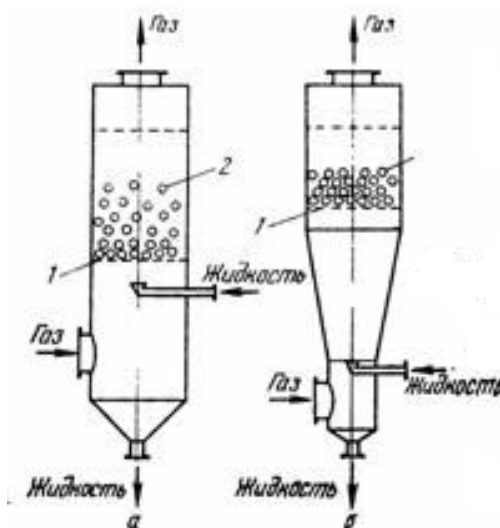


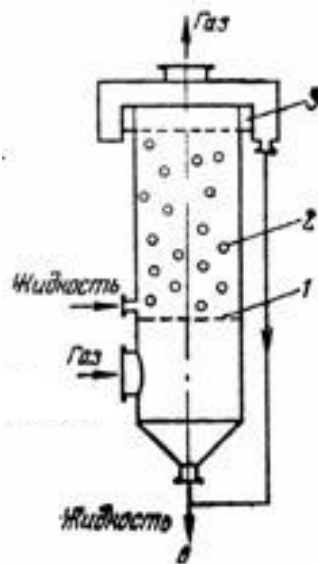
Рисунок 4. АПН с прямоточной подачей фаз снизу вверх:

а – подача жидкости под решетку; б – с подачей жидкости на некотором расстоянии от решетки; 1 – опорно-распределительная решетка; 2 – псевдооживленная насадка; 3 – брызгоуловитель.

Нижнюю часть аппарата выполняют расширяющейся кверху. В данных аппаратах жидкость вместе с газом снизу-вверх поступает в псевдооживленный слой насадки, где они взаимодействуют. Режим работы данных абсорберов таков, что жидкость проваливается сквозь опорно-распределительную решетку, не достигая верха псевдооживленного слоя. В такого типа аппаратах уменьшается брызгоунос, и они могут работать без брызгоуловителей (роль брызгоуловителей играет верхняя

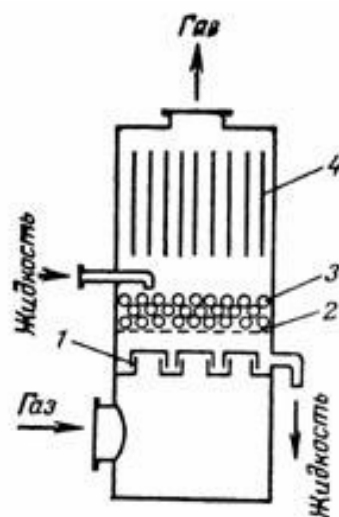
часть псевдооживленного слоя). Также, исключается налипание твердых частиц на нижнюю часть опорно-распределительной решетки. Недостатками данной конструкции является слабое перемешивание жидкости, поступающей в слой, и недостаточным контактом ее с газом. А также необходимо интенсивно распылять жидкость при подаче ее под решетку, что довольно сложно при работе с жидкостями, содержащими твердые взвеси.

Предложен еще один вид такого аппарата – прямоточный абсорбер с псевдооживленной насадкой в которую вся жидкость, поступающая в аппарат, выносится, отделяясь в циклоне, расположенном вне абсорбера и вновь возвращается в абсорбер для повторного использования (рисунок 4, в)



**Рисунок 4.в. АПН с подачей жидкости на решетку, с прямоточной подачей фаз снизу-вверх: 1 – опорно-распределительная решетка; 2 – псевдооживленная насадка; 3 – брызгоуловитель.**

*Абсорбер с псевдооживленной насадкой и организованной подачей газа под опорно-распределительную решетку*



**Рисунок 5. Абсорбер с организованной подачей газа и псевдооживленной насадкой:**  
**1 – газораспределительная тарелка с дутьевыми колпачками; 2 – тарелка провальной типа;**  
**3 – насадочные тела; 4 – плоскопараллельная насадка.**

На рисунке 5 показан абсорбер с провальной тарелкой, на которой для интенсификации массообмена расположены элементы насадки, находящиеся в псевдооживленном состоянии. Для подачи газа и отвода жидкости под провальной тарелкой установлены дутьевые колпачки. Абсорбер снабжен брызгоуловителем в виде плоскопараллельной насадки.

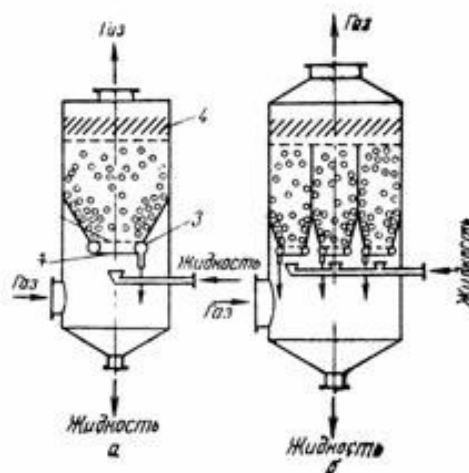
#### Абсорбер с псевдооживленной насадкой фонтанирующего типа.

В аппаратах данного типа часть опорно-распределительной решетки выступает в роли только отвода отработанной жидкости, а через главную часть решетки поступает в псевдооживленный слой прямогоком жидкая и газовая фазы. Для обеспечения наиболее устойчивого контакта между фазами и уменьшения количества жидкости, подаваемой на орошение аппарата, предложена конструкция АПН, в которой для создания высокой турбулизации потоков часть рабочей зоны выполнена в виде конуса, способствующего образованию фонтанирующего слоя насадки.

На рисунке 6а показана одна из конструкций такого аппарата. Жидкость и газ прямогоком поступают в рабочую зону аппарата и вследствие большой линейной скорости (свыше 10 м/с) вместе с шарами поднимаются до ограничительной решетки, которая к боковой поверхности рабочей зоны отклоняет поток. Жидкость и шары спускаются вниз, шары съезжают к центру опорно-распределительной решетки и с помощью газожидкостного потока направляются вверх, а жидкость выходит



из аппарата через кольцевой желоб (часть отработанной жидкости может быть в циркуляционном контуре, создавая дополнительную поверхность контакта).



**Рисунок 6. Абсорбер с псевдооживленной насадкой фонтанирующего типа:**  
**а** – односекционный аппарат; **б** – аппарат с несколькими вертикальными секциями;  
**1** – подвод газа и жидкости; **2** – опорная решетка; **3** – кольцевой желоб; **4** – брызгоуловитель.

Ограничительная решетка сделана изогнутой, и для улучшения циркуляции насадки перед ней установлены направляющие пластины. При огромных расходах газа в один корпус помещают несколько работающих аппаратов (Рисунок 6, б).

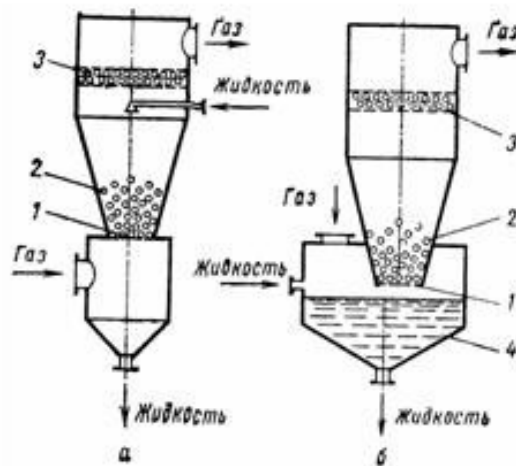
В качестве насадки в аппаратах служат шары диаметром 30-50 мм и массой 2,5-10 г. Высота секции находится в пределах 0,8-2,5 м, скорость газа при входе в псевдооживленный слой составляет 10-30 м/с. Расход жидкости на 1 м<sup>3</sup> перерабатываемого газа меняется в широких пределах: 0,05-10 л/м<sup>3</sup>. От вариации параметров процесса зависит гидравлическое сопротивление и составляет 200-3000 Па. К недостаткам этих аппаратов можно отнести заметный рост гидравлического сопротивления с увеличением расхода газа. Так, на 30% изменив расход газа, гидравлическое сопротивление возрастет на 70% от первоначальных значений. Данные аппараты рекомендуются для осуществления тепло-массообмена и пылеулавливания. От перепада давления в аппарате зависит степень улавливания пыли. Степень улавливания доломитовой пыли при перепаде давления 500Па доходит до 70% и при 2500 Па она составляет 92%.

### *Конические абсорберы с псевдооживленной насадкой (КСШ)*

На рисунке 7 показаны два вида КСШ. Аппараты имеют форму перевернутого усеченного конуса, в нижней части которого скорость газа должна быть достаточной для псевдооживления (рекомендуется 6-10 м/с). В верхней части аппарата скорость газа уменьшают до 1-2 м/с для минимального уноса брызг. Наиболее насыщенно псевдооживление происходит около нижнего основания, постепенно уменьшаясь по высоте, причем для улавливания образующихся в нижней части брызг служат верхние малоподвижные слои насадки.

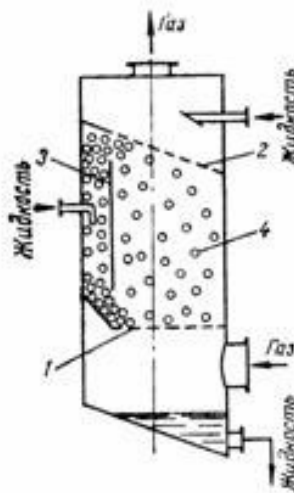
В аппаратах такого типа по сравнению с абсорберами с постоянным поперечным сечением насадка псевдооживляется в наиболее плотный слой. Это улучшает распределение в насадке жидкости, обеспечивает более плотный контакт жидкости и газа, позволяет изменять скорости газа в широком диапазоне. Неподвижная высота слоя равна 0,5-0,8 м.

В абсорбере на рисунке 7а жидкость подается сверху противотоком по отношению к газу. В абсорбере на рисунке 7б жидкость эжектируется газом из нижнего сборника, в котором поддерживается неизменный уровень. Смешение сред происходит по оси аппарата, так как скорость газа максимальная. Аппараты эжекционного типа не требуют насосов для подачи орошающей жидкости. Такие аппараты рекомендуется применять при температуре газа свыше 100°C, так как жидкость соприкасается с газами еще в сборнике, и насадка сохраняется от воздействия высокой температуры. Из недостатков данного типа аппаратов можно отнести трудность эксплуатации при колебаниях расходов жидкости и газа.



**Рисунок 7. Конический абсорбер с подвижной насадкой:**  
**а – форсуночный вариант, б – эжекционный вариант;**  
**1 – опорно-распределительная решетка; 2 – шаровая насадка;**  
**3 – брызгоулавливающий слой шаров; 4 – сборник жидкости.**

*Аппарат с подвижной насадкой и высокой пропускной способностью по газовой фазе (Рисунок 8)*



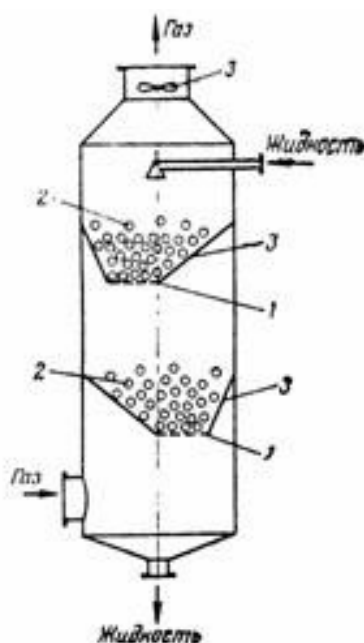
**Рисунок 8. АПН с высокой пропускной способностью по газу:**  
**1 – опорно-распределительная решетка; 2 – наклонная ограничительная решетка;**  
**3 – перегородка; 4 – шаровая насадка.**

Циркуляция псевдоожиженной насадки происходит в рабочей зоне абсорбера, в свободном сечении аппарата при скоростях газа, превышающих скорости в прочих конструкциях, что обеспечивается организацией упорядоченных потоков жидкости и газа. Для этого предусмотрена сплошная перегородка, делящая зону контакта на две. В большей части аппарата происходит абсорбция, в другой части циркуляция

насадки под эжектирующим действием подаваемой в зону вспомогательной жидкости. Плотность орошения в такой колонне может достигать до 180 м/ч, а скорость газа до 8,6 м/с.

*Абсорбер со смещенными по оси аппарата коническими слоями псевдооживленной насадки (Рисунок 9)*

Для уменьшения брызгоуноса по оси аппарата смещают конические слои так, чтобы брызги из предшествующего слоя не попали на опорно-распределительную решетку следующего слоя.



**Рисунок 9. Абсорбер со смещенными коническими слоями псевдооживленной насадки: 1 – опорно-распределительная решетка; 2 – насадки; 3 – брызгоуловитель.**

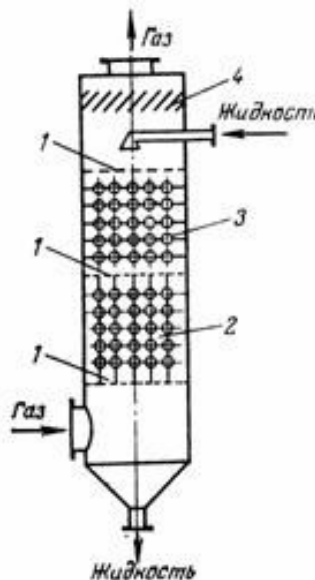
### *Другие виды АПН*

Для усиления массообменных процессов предложен аппарат, у которого опорно-распределительная решетка снабжена дутьевыми патрубками для вращательного движения насадки.

При переменном расходе жидкости и газа через абсорбер можно использовать аппарат с поплавковыми клапанами и опорно-распределительной решеткой.

Существуют также аппараты с опорно-распределительными решетками, сделанными на выступающих сверху участках сплошными и перфорированными на остальной части. По мнению авторов данного изобретения, это ведет к уменьшению

гидравлического сопротивления и увеличению эффективности работы. Для повышения пропускной способности абсорберов и уменьшения гидравлического сопротивления используют шаровую насадку, расположенную на нитях в продольном и поперечном сечениях (Рисунок 10).



**Рисунок 10. Абсорбер с расположением шаровой насадки на упругих нитях:**  
1 – опорно-распределительная решетка; 2 – секция аппарата с горизонтально расположенными нитями; 3 – секция с вертикально расположенными нитями; 4 – брызгоуловитель.

### 1.3 Сравнение АПН с аппаратами других типов

Сравнение аппаратов с подвижной насадкой с другими аппаратами, применяемыми в промышленности, позволяет выделить ряд преимуществ рассматриваемого типа абсорберов.

Преимущества АПН:

Относительно высокие скорости газа по всей высоте аппарата (2,5-5,5 м/с), превышающие скорости газа в аппаратах других типов (насадочных, барботажных и др.), за исключением скоростных полых скрубберов, в которых скорость составляет 3,5-6 м/с. Хотя в абсорберах типа Вентури скорость газа в горловине гораздо выше, чем в АПН, но они по размерам уступают рассчитанным по газу абсорберам с псевдооживленной насадкой той же производительности.

Возможность работы со средами, загрязненными твердыми частицами, выпадающими в осадок в процессе абсорбции. В этом отношении АПН превосходит абсорбционные аппараты всех типов, включая полые башни, приспособленные для работы с загрязненными средами, так как в этом случае внутренние стенки полых башен могут зарастать осадками.

Широкий диапазон устойчивой работы при изменении расходов жидкости и газа через аппарат. При этом гидравлическое сопротивление АПН изменяется незначительно. Этим преимуществом обладают также полые башни и частично насадочные. Особенно неудовлетворительны в этом отношении аппараты с провальными тарелками и скрубберы Вентури.

Брызгоунос при прочих равных условиях в АПН ниже, чем в других аппаратах, что объясняется сепарирующим свойством псевдооживленной твердой насадки.

#### **1.4 Требования, предъявляемые к насадочным телам**

Для эффективной работы колонны, заполняющая насадка должна удовлетворять требованиям:

- 1) большая поверхность на единицу объема ( $m^2/m^3$ );
- 2) стойкость к химическому воздействию жидкости и газа, находящимся в колонне;
- 3) невысокое гидравлическое сопротивление;
- 4) большой свободный объем, где осуществляется контакт между жидкостью и газом;
- 5) малый удельный вес;
- 6) высокая механическая прочность;
- 7) невысокая стоимость.

#### **1.5 Цель работы**

В качестве насадочных тел для АПН наиболее предпочтительным является использование кольцевой насадки ввиду ее простоты использования и доступности для широкого применения. Определяющими размерами кольцевой насадки служат

ее диаметр  $d$  и высота  $h$ . В настоящей работе принята кольцевая насадка из полиэтилена с отношением  $h/d$  равным 0,5.

Следует отметить, что в настоящее время литература не изобилует информацией о работе с АПН с применением кольцевых насадок [10, 11]. В этой связи в дипломном проекте предпринято экспериментальное изучение некоторых гидродинамических характеристик АПН с кольцевой насадкой применительно к процессу моноэтаноловой очистки жирного газа от сероводорода.

## **2 Экспериментальная часть**

### **2.1 Исследование некоторых гидродинамических характеристик аппарата с подвижной кольцевой насадкой**

#### **2.1.1 Описание экспериментальной установки**

В установку для исследования гидродинамики аппарата с подвижной кольцевой насадкой входят следующие аппараты и приборы (рисунок 11).

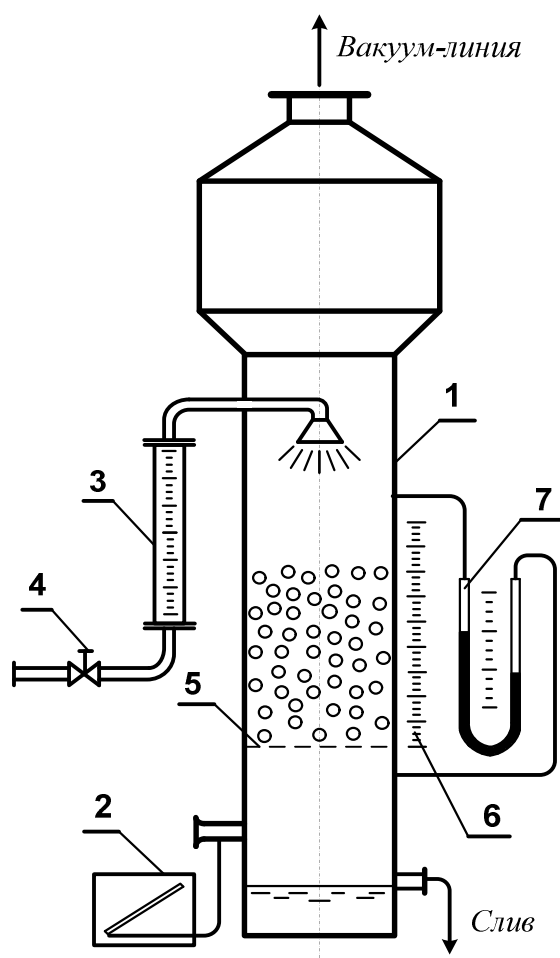
1. Колонна из оргстекла с насадкой: диаметр колонны  $D = 200$  мм; высота колонны  $H = 1270$  мм; свободное сечение опорной решетки  $f = 0,4$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>; коэффициент сопротивления опорной решетки  $\xi = 1,8$ .

2. Прибор для измерения расхода воздуха – коллектор в комплекте с микроманометром ММН-7.

3. Прибор для измерения расхода воды – ротаметр РС – 5.

Характеристики насадки: полиэтиленовые кольца  $40 \times 20 \times 2,5$ ; свободный объем насадки  $\varepsilon = 0,77$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; плотность насадки  $\rho_n = 900$  кг/м<sup>3</sup>.

Воздух просасывается через колонну вакуум-насосом, расход его регулируется вентилем 6 на вакуум-линии и определяется по показаниям микроманометра 2, который замеряет разрежение в коллекторе 1. Расход воды из водопровода измеряется ротаметром РС – 5 и регулируется вентилем 4. Высота слоя фиксируется визуально по имеющейся на колонне миллиметровой шкале 8. Замеры гидравлического сопротивления аппарата производятся по дифференциальному манометру 7.



**Рисунок 11. Схема лабораторной установки:**  
**1 – колонна с насадкой из полиэтиленовых колец; 2 – микроманометр;**  
**3 – ротаметр РС-5; 4 – вентиль; 5 – газораспределительная решетка;**  
**6 – миллиметровая шкала; 7 – U-образный дифманометр;**

### 2.1.2 Результаты эксперимента

Было выполнено несколько серий опытов по изучению зависимости гидравлического сопротивления слоя  $\Delta P$  и степени расширения слоя  $R$  от скорости газа  $W$  при различных плотностях орошения  $U$ . Результаты опытов представлены в таблице 1 и на рисунках 12, 13.



Таблица 1 – Опытные результаты

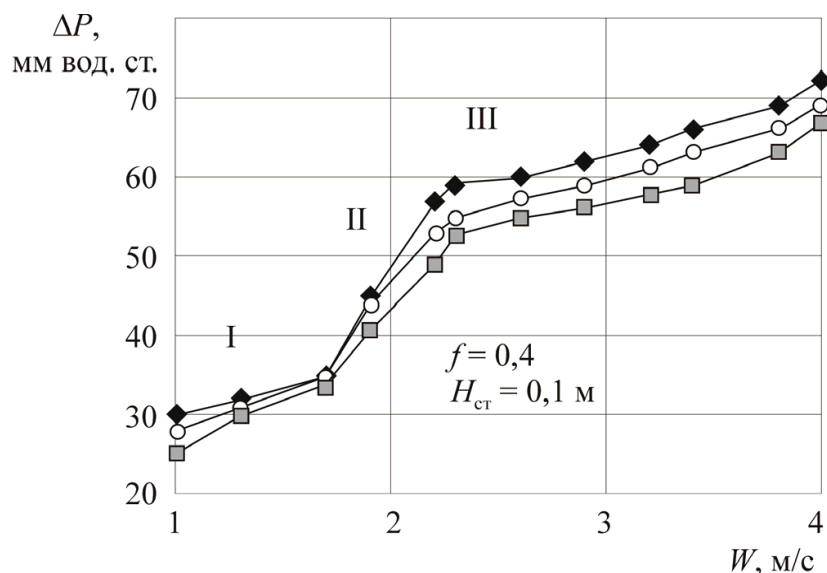
1 серия опытов, плотность орошения U=20 м/ч						
№ п/п	f, %	Нст, мм	WГ, м/с	ΔP, мм	Ндин, мм	Примечание
1	40	100	1	25	100	
2	40	100	1.3	30	100	
3	40	100	1.6	34	100	
4	40	100	1.8	45	100	
5	40	100	2	49	100	
6	40	100	2.3	51	100	Развитое псевдо-ожижение
7	40	100	2.6	53	150	
8	40	100	2.9	55	170	
9	40	100	3.2	57	200	
10	40	100	3.4	61	260	
11	40	100	3.8	63	280	
12	40	100	4	67	360	

2 серия опытов, плотность орошения U=25 м/ч						
№ п/п	f, %	Нст, мм	WГ, м/с	ΔP, мм	Ндин, мм	Примечание
1	40	100	1	28	100	
2	40	100	1.3	31	100	
3	40	100	1.6	35	100	
4	40	100	1.8	46	100	
5	40	100	2	53	150	
6	40	100	2.3	54	200	Развитое псевдо-ожижение

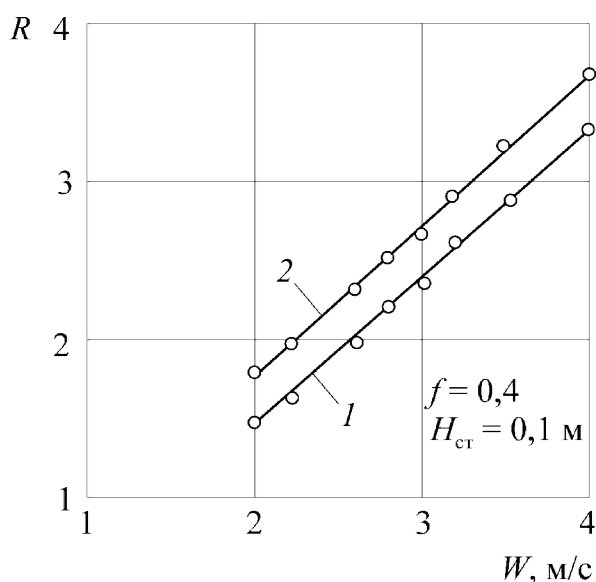
7	40	100	2.6	57	230	
8	40	100	2.9	59	250	
9	40	100	3.2	61	270	
10	40	100	3.4	63	290	
11	40	100	3.8	66	320	
12	40	100	4	69	380	

3 серия опытов, плотность орошения $U=30$ м/ч						
№ п/п	f, %	Hст, мм	WГ, м/с	$\Delta P$ , мм	Hдин, мм	Примечание
1	40	100	1	30	100	
2	40	100	1.3	32	100	
3	40	100	1.6	35	100	
4	40	100	1.8	47	100	
5	40	100	2	57	180	
6	40	100	2.3	59	200	Развитое псевдо-ожижение
7	40	100	2.6	60	220	
8	40	100	2.9	62	250	
9	40	100	3.2	64	270	
10	40	100	3.4	66	300	
11	40	100	3.8	69	370	
12	40	100	4	72	400	

Графическая интерпретация результатов опытов представлена на рисунке 12.



**Рисунок 12. Зависимость гидравлического сопротивления слоя от скорости газа при различных плотностях орошения:  $\blacklozenge$  –  $L = 20$  м/ч;  $\circ$  –  $L = 25$  м/ч;  $\blacksquare$  –  $L = 30$  м/ч.**



**Рисунок 13. Зависимость степени расширения слоя от скорости газа при различных плотностях орошения: 1 –  $U = 30$  м/ч; 2 –  $U = 20-25$  м/ч.**

Анализ зависимости гидравлического сопротивления АПН от скорости газа в полном сечении аппарата и визуальные наблюдения указывают на существование нескольких гидродинамических режимов работы аппарата.

Так, в аппаратах малого диаметра возникает начальное, промежуточное и развитое (полное) псевдооживление.

В режиме начального псевдооживления наблюдается “фонтанирование”: в псевдооживленное состояние переходят насадочные тела только в центральной части аппарата, а у стенок они остаются неподвижными. Жидкость стекает по поверхности в виде пленки. Сопротивление слоя с увеличением скорости газа в этом режиме примерно постоянное.

В режиме промежуточного псевдооживления пристеночные слои насадки приходят в движение и начинают перемещаться в ядро газового потока, но их движение у стенок заторможено. С увеличением концентрации насадки в псевдооживленном ядре возрастает количество удержанной в слое жидкости и его сопротивление.

В режиме развитого псевдооживления, поступающем при определенной для каждой плотности орошения скорости газа, пристеночный слой насадки разрушается, она полностью переходит в псевдооживленное состояние, а газовый поток практически равномерно распределяется по всему сечению аппарата. При этом наблюдается хорошее перемешивание жидкости и пузырьков газа в объеме подвижного слоя. Некоторое увеличение сопротивления слоя в этом режиме обусловлено ростом количества удерживаемой им жидкости со скоростью газового потока. Жидкость в аппарате присутствует в основном в виде капель или газожидкостной структуры, близкой к пенной.

Из рисунка 12 следует, что скорость развитого взвешивания составляет 2,3 м/с в изученном интервале плотностей орошения ( $U = 20 - 30$  м/ч).

Рисунок 13 иллюстрирует линейную зависимость степени расширения слоя от скорости газа. Так, при скорости газа  $W$  газа = 3 м/с и плотности орошения  $U = 30$  м/ч степень расширения слоя  $R = 2,6$ , а при  $W$  газа = 4 м/с и той же плотности орошения  $R = 3,5$ .

## 2.1.3 Обработка экспериментальных данных (гидравлическое сопротивление, скорость развитого псевдооживления)

Размеры колец:

$D := 40$  мм;

$h := 20$  мм;

$\delta_{\text{св}} := 2.5$  мм;

Перевод  $\Delta P$  в Н/м<sup>2</sup>:  $\Delta P = \Delta P \cdot 9.8$  ;

$i := 1..12$

$\Delta P_{1i} := \Delta P_i$       $W_{1i} := W_i$

	1		1
$\Delta P_{11} =$	225.4	$W_{11} =$	1
	294		1.2
	313.6		1.5
	343		1.8
	441		2
	509.6		2.2
	548.8		2.3
	568.4		2.8
	607.6		3
	637		3.2
	666.4		3.5
	705.6		4

$i := 12..23$

$\Delta P_{2i-11} := \Delta P_i$       $W_{2i-11} := W_i$

	1		1
$\Delta P_{21} =$	705.6	$W_{21} =$	4
	225.4		1
	294		1.2
	313.6		1.5
	343		1.8
	470.4		2
	519.4		2.2
	558.6		2.3
	578.2		2.8
	627.2		3
	656.6		3.2
	686		3.5

$i := 24..36$

$\Delta P_{3i-23} := \Delta P_i$

	1		1
$\Delta P_{31} =$	735	$W_{31} =$	4
	245		1
	294		1.2
	313.6		1.5
	343		1.8
	441		2
	490		2.2
	509.6		2.3
	548.8		2.8
	588		3
	617.4		3.2
	646.8		3.5
	686		4

Расчет эквивалентного диаметра насадки:

$$\underline{V} := 0.785 \cdot (D \cdot 10^{-3})^2 \cdot h \cdot 10^{-3} = 25.12 \times 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$d_{\text{ш}} := 1.24 \cdot \sqrt[3]{V} = 0.036 \text{ м};$$

$$F := (\pi \cdot D \cdot 10^{-6} \cdot h) + [\pi \cdot (D - 2 \cdot \delta) \cdot 10^{-6} \cdot h] + 1.57 \cdot 10^{-6} \cdot [D^2 - (D - 2\delta)^2] = 0.005 \text{ м}^2;$$

$$\Phi := \sqrt{\frac{0.207 \cdot \frac{F}{2}}{V^{\frac{2}{3}}}} = 1.131 \text{ ;}$$

$$d_{\text{э}} := d_{\text{ш}} \cdot \Phi = 0.041 \text{ м};$$

Пересчет плотности орошения в систему СИ:  $L := \frac{L}{3600}$  ;

$$L1 := L_1 = 6.944 \times 10^{-3} \text{ м/с};$$

$$L2 := L_{16} = 8.333 \times 10^{-3} \text{ м/с};$$

$$L3 := L_{30} = 5.556 \times 10^{-3} \text{ м/с};$$

Расчет критерия Рейнольдса для воды и воздуха в точках перехода к развитому псевдооживлению:

$$Re_{\text{ж.1}} := \frac{L1 \cdot d_{\text{э}}}{10^{-6}} = 285.252 \text{ ;}$$

$$Re_{\text{ж.2}} := \frac{L2 \cdot d_{\text{э}}}{10^{-6}} = 342.303 \text{ ;}$$

$$Re_{\text{ж.3}} := \frac{L3 \cdot d_{\text{э}}}{10^{-6}} = 228.202 \text{ ;}$$

$$d_a := 0.15;$$

$$f_{\text{св}} := 0.4;$$

$$H_{\text{ст}} := 0.1 \text{ м};$$

$$\frac{H_{\text{ст}}}{d_{\text{э}}} = 2.434 \text{ , тогда } \underline{K} := 2.3;$$

В результате обработки экспериментальных данных предложено уравнение для определения скорости развитого псевдооживления орошаемой кольцевой насадки:

$$\text{Re}_{ep.n} = 0,237 \cdot 10^4 \cdot \ln \left[ 33,4 \cdot \text{Re}_{ж}^{0,01} \cdot f^{0,91} \cdot \left( \frac{H_{cm}}{d_9} \right)^{0,17} \right],$$

где  $\text{Re}_{ep.n}$  - критерий Рейнольдса для орошаемой насадки в точке перехода к режиму развитого псевдооживления;

$$\text{Re}_{ep.n} = \frac{W_{p.n} \cdot d_a}{\nu_2},$$

$W_{p.n}$  - скорость развитого псевдооживления, м/с;

$d_a$  - стандартный диаметр аппарата, равный 0,2 м;

$H_{cm}$  - статическая высота слоя, м;

$\nu_2$  - кинематическая вязкость газа, м<sup>2</sup>/с;

$f$  - свободное сечение опорно-распределительной решетки, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>;

$\text{Re}_{ж}$  - критерий Рейнольдса для жидкости

$$\text{Re}_{ж} = \frac{L \cdot d_9}{\nu_{ж}},$$

где  $L$  – плотность орошения, м<sup>3</sup>/ (м<sup>2</sup> с);

$\nu_{ж}$  - кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;

Расчет сопротивления сухой решетки:

$$\rho_{Г} := 1.2 \text{ кг/м}^3; \quad i := 1..7$$

$$\zeta := 1.8;$$

$$\Delta P_{\text{реш}_i} := \zeta \cdot \frac{\rho_{Г}}{2} \cdot \left( \frac{W_{i+7}}{f_{св}} \right)^2;$$

	1
1	52.92
2	60.75
3	69.12
4	82.688
5	108
6	6.75
7	9.72

$\Delta P_{\text{реш}} =$

Расчет сопротивления сухой насадки:

$$\rho_H := 920 \text{ кг/м}^3;$$

$$\varepsilon := 0.77 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$\Delta P_{\text{нас}} := \rho_H \cdot 9.8 \cdot H_{\text{СТ}} \cdot (1 - \varepsilon) = 207.368 \text{ ;}$$

Расчет значений критерия Эйлера:

$A := 3.42$  - задаваемый коэффициент уравнения;

$$Re_{\Gamma_i} := \frac{W_{i+7} \cdot d_{\text{Э}}}{1.5 \cdot 10^{-5}} \text{ ;} \quad Re_{\text{ж}} := \frac{L1 \cdot d_{\text{Э}}}{10^{-6}} \text{ ;}$$

Для расчета сопротивления слоя жидкости, задержанной в объеме насадки, предлагается следующее уравнение:

$$Eu_{\text{жн}_i} := A \cdot \left( Re_{\Gamma_i} \cdot 10^{-4} \right)^{-1.9} \cdot \left( \frac{H_{\text{СТ}}}{d_{\text{Э}}} \right)^{1.06} \cdot \left( \frac{d_a}{d_{\text{Э}}} \right)^{-2.43} \cdot e^{\left[ 0.464 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{d_a}{d_{\text{Э}}} \right)^{1.05} \cdot Re_{\text{ж}}^{-0.9} \cdot f_{\text{св}} \right]}$$

$Eu_{\text{жн}} = 12.47$  Расчетный Критерий Эйлера

$Eu := 12.4$  Экспериментальный критерий Эйлера

Расчет сопротивления слоя жидкости, задержанной в объеме насадки:

$$\Delta P_{\text{жн}_i} := (W_{i+7})^2 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot Eu_{\text{жн}_i};$$

	1
$\Delta P_{\text{жн}} =$	6.871
	6.918
	6.963
	7.026
	7.12
	6.198
	6.312



Таблица 2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	"№ точек"	"V, м3/ч"	"w, м/с"	"Рт, Н/м2"	"Роп, Н/м2"	"Re г.р.п."	Wпр. теор"	"Wпр.оп"
1	9	429.6	3.8	503.3	490	1.041·10 <sup>4</sup>	2.31	2.3
2	10	452.2	4	522.6	509.6	1.095·10 <sup>4</sup>	2.27	2.3
3	11	474.8	4.2	542.9	529.2	1.15·10 <sup>4</sup>	2.34	2.3
4	12	508.7	4.5	575.1	558.6	1.232·10 <sup>4</sup>	2.29	2.3
5	13	542.6	4.8	609.4	607.6	1.314·10 <sup>4</sup>	2.3	2.3
6	14	565.2	5	633.4	637	1.369·10 <sup>4</sup>	2.28	2.3
7	15	587.8	5.2	658.4	686	1.424·10 <sup>4</sup>	2.31	2.3

#### 2.1.4 Математическое планирование эксперимента (коэффициент расширения псевдооживленного слоя)

Определение коэффициента расширения трехфазного псевдооживленного слоя осуществлялось с использованием метода математического планирования экспериментов [13-15].

Коэффициент расширения определялся с использованием критериального уравнения:

$$R = A \cdot \exp(m \cdot Re_z) \cdot Re_{жz}$$

где A, m, n – постоянные коэффициенты.

Таблица 3. Исходные данные.

Насадка: кольца полиэтиленовые 40x20x2.5 Свободное сечение решетки f=40% Статич. Высота слоя насадки Нст=100мм.						
№ опыта	Wг, м/с	L, м/ч	R			
1	4	30	3,8	3,7	3,8	3,9
2	4	20	3,5	3,55	3,45	3,5
3	3	30	2,7	2,7	2,66	2,74
4	3	20	2,3	2,29	2,31	2,3

1.1 Приводим уравнение у линейному виду:

$$\ln R = Y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2$$

1.2 Определяем значения факторов на верхнем и нижнем уровнях:

$$\nu_{\text{ж}} = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \nu_{\text{г}} = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \text{Динамическая вязкость воздуха и воды};$$

$$V_{\text{э}} = 20 \cdot \pi \cdot 40^2 \cdot 10^{-9} = 100.531 \times 10^{-6} \text{ м}^3 - \text{Объем элемента насадки};$$

$$F_{\text{э}} = \left[ 20\pi \cdot (40 + 35) + 2 \cdot \pi \cdot (40^2 - 35^2) \right] \cdot 10^{-6} = 7.069 \times 10^{-3} \text{ м}^2 - \text{полная геометрическая поверхность элемента насадки};$$

$$d_{III} = 1.24 \cdot \sqrt[3]{V} = 57.657 \times 10^{-3} \text{ м - диаметр шара, равновеликого по объему элементу насадки;}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{0.207 \cdot \frac{F}{2}}{V^{\frac{2}{3}}}} = 0.823 \quad \text{Фактор формы;}$$

$$d_{\mathcal{O}} = \phi \cdot d_{III} = 47.432 \times 10^{-3} \text{ м - эквивалентный диаметр насадки;}$$

$$Re_{\text{газ.верх}} = \frac{\max(W_r) \cdot d_{\mathcal{O}}}{\nu_r} = 1.265 \times 10^4; \quad Re_{\text{жидк.верх}} = \frac{\max(L) \cdot d_{\mathcal{O}}}{\nu_{\text{ж}} \cdot 3600} = 395.268$$

$$\ln(Re_{\text{жидк.верх}}) = 5.98$$

$$Re_{\text{газ.низ}} = \frac{\min(W_r) \cdot d_{\mathcal{O}}}{\nu_r} = 9.486 \times 10^3; \quad Re_{\text{жидк.низ}} = \frac{\min(L) \cdot d_{\mathcal{O}}}{\nu_{\text{ж}} \cdot 3600} = 263.512$$

$$\ln(Re_{\text{жидк.низ}}) = 5.574$$

1.3 Находим кодированные значения факторов:

а) определяем натуральные значения центра изучаемой области:

$$Re_{\text{газ.0}} = \frac{Re_{\text{газ.верх}} + Re_{\text{газ.низ}}}{2} = 1.107 \times 10^4$$

$$\ln Re_{\text{жидк.0}} = \frac{\ln(Re_{\text{жидк.низ}}) + \ln(Re_{\text{жидк.верх}})}{2} = 5.777$$

б) вычисляем интервалы варьирования:

$$\Delta Re_{\text{газ}} = \frac{Re_{\text{газ.верх}} - Re_{\text{газ.низ}}}{2} = 1.581 \times 10^3$$

$$\Delta \ln Re_{\text{жидк}} = \frac{\ln(Re_{\text{жидк.верх}}) - \ln(Re_{\text{жидк.низ}})}{2} = 0.203$$

в) кодируем значения переменных:

Таблица 4. Натуральные значения факторов.

Наименование	1-ый фактор	2-ой фактор
Основной уровень	11067,51	5,78
Интервал варьирования	1581,07	0,20
Верхний уровень	12648,58	5,98
Нижний уровень	9486,44	5,57

$$X_{1.B} = \frac{Re_{\text{газ.верх}} - Re_{\text{газ.0}}}{\Delta Re_{\text{газ}}} = 1 \quad X_{2.B} = \frac{\ln(Re_{\text{жидк.верх}}) - \ln Re_{\text{жидк.0}}}{\Delta \ln Re_{\text{жидк}}} = 1 \quad ; \quad (16)$$

$$X_{1.H} = \frac{Re_{\text{газ.низ}} - Re_{\text{газ.0}}}{\Delta Re_{\text{газ}}} = -1 \quad X_{2.H} = \frac{\ln(Re_{\text{жидк.низ}}) - \ln Re_{\text{жидк.0}}}{\Delta \ln Re_{\text{жидк}}} = -1 \quad ; \quad (17)$$

Таблица 5. Матрица планирования.

Номер опыта	Кодированные значения факторов	
	X1	X2
1	1	1
2	1	-1
3	-1	1
4	-1	-1

#### 1.4 Определение расходов воды и воздуха:

$$S_{\text{кв}} = \pi \cdot 200^2 \cdot 10^{-6} = 0.126 \quad \text{м}^2 - \text{площадь сечения колонны}; \quad (18)$$

$$V_{\text{газ.max}} = \max(W_r) \cdot 3600 \cdot S = 1.81 \times 10^3 \quad \text{м}^3/\text{ч} \text{ максимальный расход газа}; \quad (19)$$

$$V_{\text{газ.min}} = \min(W_r) \cdot 3600 \cdot S = 1.357 \times 10^3 \quad \text{м}^3/\text{ч} \text{ минимальный расход газа}; \quad (20)$$

$$V_{\text{жидк.max}} = \max(L) \cdot S = 3.77 \quad \text{м}^3/\text{ч} \text{ максимальный расход жидкости}; \quad (21)$$

$$V_{\text{жидк.min}} = \min(L) \cdot S = 2.513 \quad \text{м}^3/\text{ч} \text{ минимальный расход жидкости}; \quad (22)$$

## 2. Проведение эксперимента.

Таблица 6. Результаты опытов и расчетов.

Номер опыта	Кодированные значения факторов		Экспериментальные результаты		Расчетные результаты										
					Параллельные измерения									Si <sup>2</sup>	
	X1	X2	H дин.1	H дин.2	H дин.3	R1	R2	R3	LnR1	LnR2	LnR3	(LnR1-LnRc) <sup>2</sup>	(LnR2-LnRc) <sup>2</sup>		(LnR3-LnRc) <sup>2</sup>
1	1	1	0,37	0,38	0,39	3,7	3,8	3,9	1,31	1,34	1,36	7E-04	0	0	0,00069
2	1	-1	0,355	0,345	0,35	3,6	3,5	3,5	1,27	1,24	1,25	2E-04	0	0	0,0002
3	-1	1	0,27	0,266	0,274	2,7	2,7	2,7	0,99	0,98	1,01	5E-09	0	0	0,00022
4	-1	-1	0,229	0,231	0,23	2,3	2,3	2,3	0,83	0,84	0,83	2E-05	0	0	1,9E-05

Сумма дисперсий воспроизводимости:

$$\sum S_i = \sum_i S_{i_1} = 1.135 \times 10^{-3}$$

Опытное значение критерия Кохрена:

$$G_{\text{оп}} = \frac{\max(S_i)}{\sum S_i} = 0.61$$

Однородность дисперсий:  $G_{\text{оп}} \leq 0.769$  - условие выполняется;

$$Se_2 = \frac{\sum S_i}{4} = 2.839 \times 10^{-4}$$

Средняя дисперсия:

Дисперсия коэффициентов:

$$Se_{2_{B_j}} = \frac{Se_2}{4} = 70.963 \times 10^{-6}$$

$$S_{B_j} = \sqrt{Se_{2_{B_j}}} = 8.424 \times 10^{-3}$$

Таблица 7. Исходные данные для расчета коэффициентов уравнения регрессии.

Номер точки плана	X0	X1	X2	LnRj	LnRj^	(LnRj-LnRj^)^2
1	1	1	1	1,33477		
2	1	1	-1	1,252695		
3	1	-1	1	0,993179		
4	1	-1	-1	0,832903		

Расчет коэффициентов уравнения регрессии:

$$B_0 = \frac{\sum_i (X_{0_i} \cdot \text{LnR}_{j_i})}{4} = 1.103$$

$$B_1 = \frac{\sum_i (X_{1_i} \cdot \text{LnR}_{j_i})}{4} = 0.19$$

$$B_2 = \frac{\sum_i (X_{2_i} \cdot \text{LnR}_{j_i})}{4} = 0.061$$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии:

$$t_1 = \frac{|B_1|}{S_{B_j}} = 22.596;$$

$$t_2 = \frac{|B_2|}{S_{B_j}} = 7.192$$

$$t_{кр} = 2.31$$

Расчетное значение параметра оптимизации:

$$\text{LnR}\Delta = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 = \begin{pmatrix} 1.354 \\ 1.233 \\ 0.974 \\ 0.852 \end{pmatrix}$$

Таблица 8. Данные для проверки адекватности уравнения регрессии.

Номер точки плана	X0	X1	X2	LnRj	LnRj^	(LnRj-LnRj^)^2
1	1	1	1	1,33477	1,35432	0,000382208
2	1	1	-1	1,252695	1,233145	0,000382208
3	1	-1	1	0,993179	0,973628	0,000382208
4	1	-1	-1	0,832903	0,852453	0,000382208

$$S_{LF\_2} = \frac{1 \cdot \left( \sum_i Y_i \right)}{4.3} = 1.274 \times 10^{-4}$$

Опытное значение критерия Фишера:

$$F_{оп} = \frac{S_{LF\_2}}{Se\_2} = 0.449$$

Опытное значение критерия Фишера меньше критического  $F_{кр}=5,3$ , значит уравнение адекватное.

Замена кодируемых переменных натуральными:

$$\text{LnR}\Delta = -1.858 + 1.376 \times 10^{-4} \cdot Re_T + 0.307 \cdot \ln(Re_{ж})$$

$$R_{иск} = 0.156 \cdot e^{1.376 \times 10^{-4} \cdot Re_{газ}} \cdot Re_{жидк}^{0.307}$$

Расчет значений  $R_{иск}$ , соответствующих точкам плана:

$$Re_{газ} = \frac{W_r \cdot d_{\text{э}}}{\nu_r} = \begin{pmatrix} 1.265 \times 10^4 \\ 1.265 \times 10^4 \\ 9.486 \times 10^3 \\ 9.486 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

$$Re_{жидк} = \frac{L \cdot d_{\text{э}}}{\nu_{ж} \cdot 3600} = \begin{pmatrix} 395.268 \\ 263.512 \\ 395.268 \\ 263.512 \end{pmatrix}$$

Статистическая обработка результатов эксперимента позволила получить следующее критериальное уравнение для расчета коэффициента расширения:

$$R = 0,139 \cdot \exp(1,2 \cdot 10^{-4} \cdot Re_2) \cdot Re_{жс}^{0,3},$$

где  $Re_2$  - критерий Рейнольдса для газа,

$$Re_2 = \frac{W_2 \cdot d_2}{\nu_2},$$

$W$  – скорость газа в полном сечении аппарата, м/с.

### 3. Технологический расчет колоны

#### Исходные данные

Расход газа  $V_{гр} = 9000$  м<sup>3</sup>/ч (при 40 градусах Цельсия), расход водного раствора МЭА  $V_p = 18.2$  м<sup>3</sup>/ч.

Концентрация  $H_2S$  в насыщенном растворе МЭА не должна превышать 0.3 моль газа/моль МЭА [16].

Массовая доля МЭА в растворе  $X$  - не более 0.15 [16] (Принимаем  $X = 0.122$ ).

#### 3.1. Выбор основных параметров АПН

Принимаем АПН с двумя секциями.

$d_k := 0.04$  диаметр колец в насадке, м;

$h_{стат} := 0.25$  высота статического слоя насадки, м;

$f := 0.4$  свободное сечение решетки;

$V_{гр} := 9000$  расход газа, м<sup>3</sup>/час;

$V_p := 18.2$  расход раствора МЭА, м<sup>3</sup>/час;

$\rho_k := 900$  плотность колец;

$g := 9.81$

$P := 1.2$  Давление в аппарате, кгс/см<sup>2</sup>;

$\rho_{жид} := 998$  плотность раствора МЭА;

$T := 45$  Температура газа, градусы Цельсия;

$T_0 := 273$  Градусов Цельсия;

$P_0 := 1$  Давление, кгс/см<sup>2</sup>;

#### 2.2. Определение диаметра аппарата

Принимаем скорость газа в аппарате при рабочих условиях

$W_{газ} := 4$  м/с;

Диаметр аппарата:

$$D := \sqrt{\frac{V_{гр}}{3600 \cdot 0.785 \cdot W_{газ}}} = 0.892 \text{ м};$$



Принимаем диаметр аппарата 1 м, тогда фактическая скорость газа будет равна 3.2 м/с, что согласуется с результатами эксперимента ( $W_{\text{газ}} > W$ , где  $W = 2.3$  м/с).

$$W_{\text{газ}} := 3.2 \quad \text{м/с};$$

### Плотность орошения

$$L_{\text{ор}} := \frac{V_p}{0.785 \cdot D_{\text{ап}}^2} = 23.185 \quad \text{м/ч};$$

### 3.3. Определение коэффициента массопередачи

Коэффициент массоотдачи в газовой фазе [1]

$$\beta_{\text{гв}} := 223 \cdot W_{\text{газ}}^{1.61} \cdot L_{\text{ор}}^{0.24} \cdot h_{\text{стаг}}^{-0.39} \cdot f^{-0.55} \cdot d_{\text{к}}^{-0.29} \cdot \rho_{\text{к}}^{0.27} = 1.399 \times 10^5 \quad \text{ч}^{-1}$$

Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе [2]

$$\beta_{\text{жв}} := 2.52 \cdot W_{\text{газ}}^{1.36} \cdot L_{\text{ор}}^{0.59} \cdot h_{\text{стаг}}^{-0.4} \cdot f^{-1.3} = 448.766 \quad \text{ч}^{-1}$$

### Константа фазового равновесия [3]

$p_1 := 0.006$  давление  $\text{H}_2\text{S}$  над 2н раствором (12.2% вес.) МЭА, атм;

$M_{\text{ж}} := 18$  молекулярная масса абсорбента (по воде);

$M_{\text{к}} := 34$  молекулярная масса  $\text{H}_2\text{S}$ ;

$X_1 := 0.122$  массовая доля МЭА в растворе (не более 0.15);

$$x := \frac{M_{\text{ж}} \cdot X_1}{M_{\text{к}}} = 0.065 \quad \text{мольная доля } \text{H}_2\text{S} \text{ в абсорбенте};$$

$$m_{\text{рх}} := \frac{p_1}{x} = 0.093 \quad \text{бар};$$

$R := 0.0831$  универсальная газовая постоянная, кДж/моль\*К;

$$m_{\text{с}} := m_{\text{рх}} \cdot \frac{M_{\text{ж}}}{\rho_{\text{жид}} \cdot R \cdot (T + 273)} = 6.34 \times 10^{-5} \quad \text{константа фазового равновесия};$$

### Коэффициент массопередачи

$$K_{gv} := \frac{1}{\frac{1}{\beta_{gv}} + \frac{mc}{\beta_{жv}}} = 1.372 \times 10^5 \quad \text{ч}^{-1}$$

### 3.4. Расчет коэффициента извлечения

Число единиц переноса на одну тарелку [1]:

$$N_{op} := \frac{K_{gv} \cdot h_{стат}}{3600 \cdot W_{газ}} = 2.978$$

Удельный расход жидкости

$$l := \frac{V_p}{V_{гр}} = 2.022 \times 10^{-3}$$

Абсорбционный фактор

$$A := \frac{1}{mc} = 31.895$$

Параметр q для случая полного перемешивания жидкости в слое [17]:

$$q := \frac{1}{A} + \left[ 1 - \left( \frac{1}{A} \right) \right] \cdot e^{-N_{op}} = 0.081$$

Степень извлечения для двух секций

n := 2 число секций;

$$\varphi := \frac{(1 - q^n) \cdot A}{A - q^n} = 0.994$$

### 3.5. Расчет гидравлического сопротивления АПН [1]

$\xi := 1.8$  коэффициент сопротивления решетки, зависящий от геометрических и конструктивных особенностей;

$\rho_{г} := 1.2$  плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;

$$\Delta P_p := \xi \cdot \frac{\rho_{г}}{2} \cdot \left( \frac{W_{газ}}{f} \right)^2 = 69.12 \quad \text{сопротивление сухой решетки, Па;}$$

$\rho_k = 900$  - плотность насадки;

$\varepsilon := 0.77$  свободный объем насадки, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$\Delta P_{сн} := \rho_k \cdot g \cdot h_{стат} \cdot (1 - \varepsilon) = 507.667$  сопротивление сухой псевдооживленной насадки Па;

$\nu_{г} := 1.5 \cdot 10^{-5}$  кинематическая вязкость смеси газов (определяющий компонент метан), м<sup>2</sup>/с;

$a := 110$  удельная поверхность насадки, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;

$d_{э} := \frac{4 \cdot \varepsilon}{a} = 0.028$  эквивалентный диаметр насадки, м;

$Re_{г} := \frac{W_{газ} \cdot d_{э}}{\nu_{г}} = 5.973 \times 10^3$  критерий Рейнольдса для газа;

$\nu_{ж} := 1 \cdot 10^{-6}$  кинематическая вязкость 15% водного раствора МЭА, м<sup>2</sup>/с;

$d_a := D_{ап}$

$Re_{ж} := \frac{L_{оп} \cdot d_{э}}{\nu_{ж} \cdot 3600} = 180.326$  критерий Рейнольдса для жидкости;

$Eu = \frac{189 \cdot (Re_{г} \cdot 10^{-4})^{-1.9} \cdot \left(\frac{h_{стат}}{d_{э}}\right)^{1.06} \cdot \left(\frac{d_a}{d_{э}}\right)^{-2.43}}{e^{\left[0.464 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{d_a}{d_{э}}\right)^{1.05} \cdot Re_{ж}^{-0.9} \cdot f\right]^{-1}}} = 12.4$  критерий Эйлера;

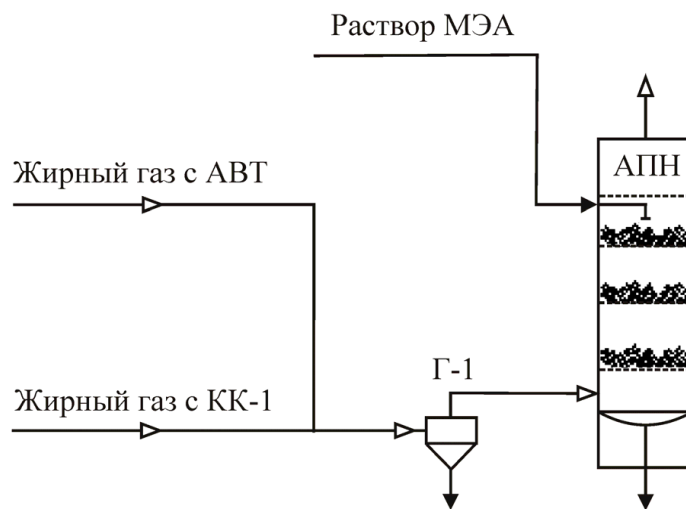
$\Delta P_{жн} := Eu \cdot \rho_{г} \cdot W_{газ}^2 = 152.371$  сопротивление слоя жидкости, задержанного в слое насадки, Па;

$\Delta P_1 := \Delta P_{сн} + \Delta P_{жн} + \Delta P_p = 729.159$  сопротивление одного слоя насадки, Па;

Гидравлическое сопротивление 2 слоев насадки

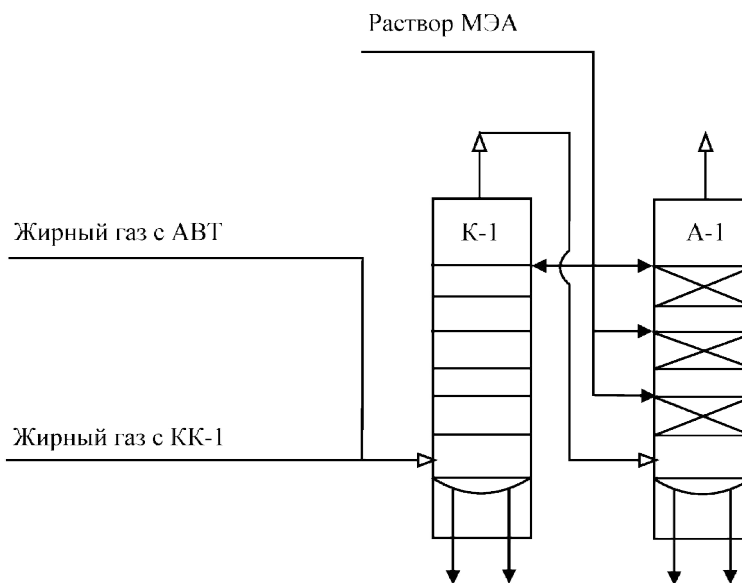
$\Delta P_{12} := 2 \cdot \Delta P_1 = 1.458 \times 10^3$  Па;

Технологические расчеты АПН применительно к процессу хемосорбции сероводорода раствором МЭА, выполненные с применением результатов эксперимента, показали возможность замены двух существующих в производстве абсорберов диаметром 2 м одним АПН диаметром 0,9-1,0 м (Рисунок 14 а,б)



**Рисунок 14а. Схема очистки жирного газа от  $H_2S$  установок КК-1 и АВТ с применением АПН**

Г-1 – выносной центробежный каплеуловитель (замена отбойной тарелки абсорбера К-1 в предлагаемом аппаратном оформлении).



**Рисунок 14б. Существующая технологическая схема очистки жирного газа от  $H_2S$  установок КК-1 и АВТ с раствором МЭА**

### 3.6. Расчет гидравлического сопротивления каплеуловителя [21]

$W_{\text{кап}} := 10$  скорость газа в сечении каплеуловителя, м/с;

$\xi_{\text{кап}} := 4.7$  коэффициент сопротивления каплеуловителя;

$$\Delta P_{\text{кап}} := \xi_{\text{кап}} \cdot \frac{\rho_{\text{г}} \cdot W_{\text{кап}}^2}{2} = 282 \quad \text{Н/м}^2;$$

Полное сопротивление АПН с двумя секциями и каплеуловителем

$\Delta P_{\text{гп}} := 200$  сопротивление на входе и выходе газа, Па;

$\Delta P_{\text{общ}} := \Delta P_{12} + \Delta P_{\text{кап}} + \Delta P_{\text{гп}} = 1.94 \times 10^3$  Па;

### 3.7. Расчет диаметров штуцеров

Вход и выход газа:

$W_{\text{штг}} := 15$  максимальная скорость газа, м/с;

$$d_{\text{газ}} := \sqrt{\frac{V_{\text{гр}}}{0.785 \cdot 3600 \cdot W_{\text{штг}}}} = 0.461 \quad \text{м};$$

Принимаем штуцер диаметром 0.5 м;

Вход жидкости:

$W_{\text{штж1}} := 1.5$  максимальная скорость жидкости, м/с;

$$d_{\text{жид1}} := \sqrt{\frac{V_{\text{р}}}{0.785 \cdot 3600 \cdot W_{\text{штж1}}}} = 0.066 \quad \text{м};$$

Принимаем штуцер диаметром 0.08 м;

Выход жидкости:

$W_{\text{штж2}} := 0.5$  скорость жидкости, м/с;

$$d_{\text{жид2}} := \sqrt{\frac{V_{\text{р}}}{0.785 \cdot 3600 \cdot W_{\text{штж2}}}} = 0.113 \quad \text{м};$$

Принимаем штуцер диаметром 0.15 м;

### 3.8. Расчет диаметра каплеуловителя [22]

Принимаем скорость газа в сечении каплеуловителя равной 10 м/с

$$W_{\text{кап}} = 10 \text{ м/с;}$$

$$D_{\text{кап}} := \sqrt{\frac{V_{\text{гр}}}{0.785 \cdot 3600 \cdot W_{\text{кап}}}} = 0.564$$

Принимаем диаметр каплеуловителя 0.765 м;

### 3.9. Ороситель [21]

Для оптимального орошения 3-х фазного слоя раствором МЭА выбираем ороситель типа "Перфорированный стакан" (Рисунок 8). Тщательное диспергирование жидкости оросителем не требуется, т.к. поверхность контакта фаз создается интенсивной циркуляцией в слое насадки.

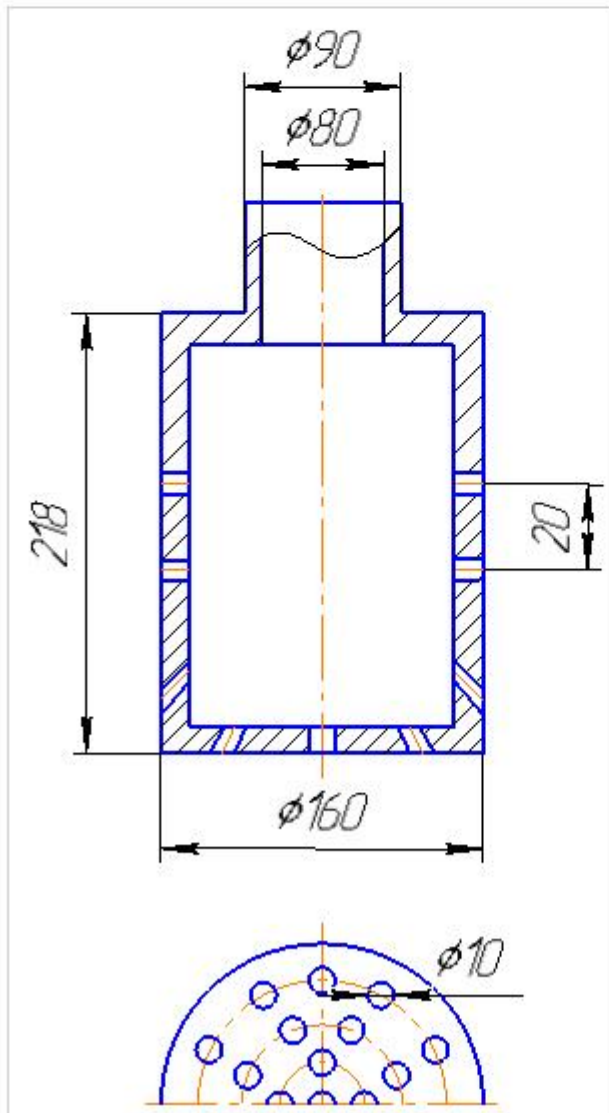


Рисунок 15. Ороситель

## 4. Прочностной расчет колонны

### 4.1 Исходные данные для механического расчета

$D_{\text{вн}} := 1$  м - внутренний диаметр колонны;

Материал корпуса 09Г2С-15, сталь конструкционная низколегированная для сварных конструкций. Допускаемое напряжение будем определять при  $t=100^{\circ}\text{C}$

$P_{\text{изб}} := 0.12$  избыточное давление в колонне, МПа;

$h := 1$  высота опоры, м.

### 4.2 Конструктивный расчет колонны

#### 4.2.1 Определение высоты колонны [18]

Высоту находят как сумму высот отдельных частей колонны

Высоту кубовой части колонны определяют из соотношения:

$$H_{\text{куб}} := (1 \div 1.5) \cdot D_{\text{вн}}$$

Принимаем

$$H_{\text{куб}} := 1.2 \text{ м}$$

Корпус колонны принимаем цельносварной (монтаж внутренних устройств через люки)

Диаметр люка и расстояние между слоями насадок принимаем одинаковыми, равными 1500 мм

$$h_{\text{T}} := 1.5 \quad D_{\text{л}} := 0.4$$

Колонну разбиваем на 3 участка: каждый участок по 1 слою насадки

Высоту участка с каплеуловителем принимаем равной 2280 мм, в нее же входит третий слой насадки

$$n_{\text{уч}} := 2 \qquad H_{\text{капл}} := 3.28 \text{ м};$$

Высота участков будет:

$$H_{\text{уч}} := h_{\text{T}} \cdot (n_{\text{уч}} - 1) = 1.5 \text{ м} \qquad H_{\text{фл}} := 0.19 \text{ м}$$

длина вылета верхнего фланца, м;

Для монтажа люка необходима высота:

$$H_{\text{л}} := D_{\text{л}} + 2(0.15 \div 0.2)$$

$$H_{\text{дн}} := 1.3 \quad \text{м}$$

Днище (крышку) колонны выбираем эллиптическое, и высота крышки (днища) составляет:

По ГОСТ 6533-78 принимаем

$$h_{\text{отб}} := 0.06 \quad \text{м}$$

$$H_{\text{дн}} := 0.25 \cdot D_{\text{абс}} + h_{\text{отб}} = 0.31$$

$$H_{\text{кр}} := 0.41$$

В итоге имеем

$$H := h + H_{\text{куб}} + 2 \cdot H_{\text{уч}} + H_{\text{капл}} + H_{\text{кр}} + H_{\text{фл}} = 9.08 \quad \text{м}$$

Принимаем  $H := 10 \quad \text{м}$

#### 4.2.2 Определение числа обслуживающих площадок

Число площадок определяем исходя из конструкции колонны, через каждые 3 метра начиная с 2.5 метров.

То есть всего обслуживающих площадок будет 4.

#### 4.3 Расчет на прочность конструктивных элементов колонны

##### 4.3.1 Расчет корпуса колонны на прочность [20]

$D_{\text{абс}} := 1 \quad \text{м}$  внутренний диаметр колонны;

$P_{\text{изб}} := 0.12 \quad \text{МПа}$  внутреннее избыточное давление;

$\sigma_{\text{д}} := 177 \quad \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$  допустимое напряжение для стали при  $t=100^\circ\text{C}$ ;

$\phi := 1$  коэффициент прочности сварного шва;

$C_{\text{к}} := 1.5 \cdot 10^{-3} \quad \text{м}$  прибавка к расчетной толщине с учетом коррозии.

Тогда расчетная толщина обечайки, будет равна:

$$S_{\text{р}} := \frac{D_{\text{абс}} \cdot P_{\text{изб}}}{2 \cdot \sigma_{\text{д}} \cdot \phi - P_{\text{изб}}} = 3.391 \times 10^{-4} \quad \text{м}$$

Исполнительная толщина стенки равна

$$S := S_{\text{р}} + C_{\text{к}} = 1.839 \times 10^{-3} \quad \text{м}$$

Принимаем толщину стенки корпуса

$$S := 0.008 \quad \text{м}$$

##### 4.3.2 Определение допустимого давления при принятой толщине стенки [18]

$$R := 0.5 \quad \text{м}$$

$$D := 1 \quad \text{м}$$



$$P := \frac{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi \cdot (S - C_K)}{D + (S - C_K)} = 2.286 \quad \text{МПа}$$

То есть колонна способна выдержать рабочее давление

#### 4.3.3 Расчет днища корпуса на прочность [19]

Материал днища так же как и корпуса 09Г2С.

Толщина стенки днища(крышки) равна

R - радиус кривизны в вершине днища(для стандартных днищ R=D)

$$S_{\text{дн}} := \frac{P_{\text{изб}} \cdot R}{2 \cdot \sigma_D \cdot \phi - 0.5 \cdot P_{\text{изб}}} + C_K = 1.67 \times 10^{-3} \quad \text{м};$$

Конструктивно толщину стенки днища принимаем

$$S_{\text{дн}} := 8 \quad \text{мм.}$$

#### 4.3.4 Подбор днища корпуса

По ГОСТ 6533-78 подбираем эллиптическое днище, у которого

$$D_{\text{дн}} := 1 \quad \text{м};$$

$$V_{\text{дн}} := 0.1617 \quad \text{м}^3;$$

$$S_{\text{дн}} := 0.008 \quad \text{м};$$

$$F_{\text{дн}} := 1.21 \quad \text{м}^2.$$

$$h_{\text{от}} := 0.025 \quad \text{м};$$

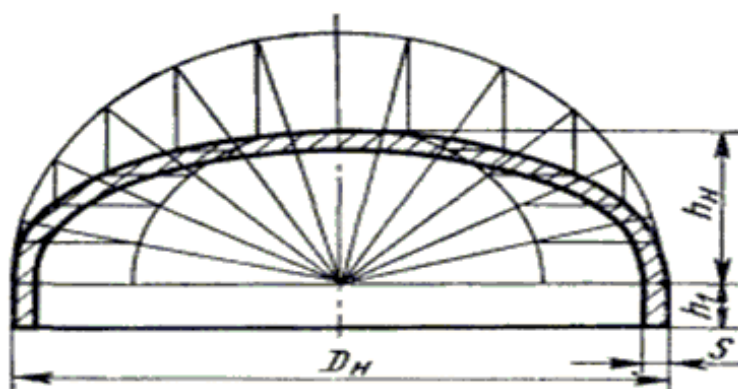


Рисунок 16. Эскиз днища

#### 4.4 Определение весовых характеристик колонны [18]

##### 4.4.1 Определение массы корпуса колонны

$$Q_{\text{дн1}} := 68.7 \text{ кг} \quad \text{масса верхнего днища;}$$

$$Q_{\text{дн2}} := 68.7 \text{ кг} \quad \text{масса нижнего днища;}$$

$$\rho := 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad \text{плотность стали;}$$

$$D_{\text{ср}} := D + S = 1.008 \text{ м} \quad \text{средний диаметр обечайки корпуса;}$$

$$V_{\text{об}} := \pi \cdot D_{\text{ср}} \cdot S \cdot (H - h - H_{\text{кр}}) = 0.218 \quad \text{объем заготовки обечайки корпуса;}$$

$$Q_{\text{об}} := \rho \cdot V_{\text{об}} = 1.708 \times 10^3 \quad \text{масса обечайки корпуса;}$$

Масса неучтенных деталей и узлов

$$Q_{\text{н}} := 0.1 \cdot (Q_{\text{дн1}} + Q_{\text{дн2}} + Q_{\text{об}}) = 184.57 \quad \text{кг;}$$

В итоге масса корпуса колонны составляет

$$Q_{\text{к}} := Q_{\text{н}} + Q_{\text{об}} + Q_{\text{дн1}} + Q_{\text{дн2}} = 2.03 \times 10^3 \quad \text{кг;}$$

##### 4.4.2 Определение насадок

$Q_{\text{т}}$  - масса насадки, кг;

$$q_{\text{т}} := 16 \text{ кг.}$$

$q_{\text{т}}$  - масса одной ситчатой тарелки, кг;

$n := 320$  масса колец Рашига в одной насадке, кг;

$$Q_{\text{т}} := q_{\text{т}} + n = 336 \quad \text{кг;}$$

##### 4.4.3 Определение массы каплеуловителя

$$Q_{\text{кап}} := 65 \quad \text{кг;}$$

##### 4.4.4 Определение массы опоры

$Q_{\text{оп.к}}$  - масса опорного кольца, кг

$Q_{\text{оп.об}}$  - масса опорной обечайки, кг

Принимаем толщину опорной обечайки  $S_1 := 0.006 \text{ м}$

Тогда масса опорной обечайки

$$Q_{\text{оп.об.}} := \rho \cdot \pi \cdot (D + S_1) \cdot S_1 \cdot h = 148.857 \quad \text{кг;}$$

Масса опорного кольца составляет:

По ОСТ 26-467-84 при  $D=1000$  мм при  $S_1=8$  мм

$$S_2 := 0.02 \text{ м};$$

$$D_3 := 1.28 \text{ м};$$

$$D_1 := 0.95 \text{ м}.$$

$$Q_{\text{оп.к}} := \rho \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_3^2 - D_1^2) \cdot S_2 = 90.742 \text{ кг}$$

$$Q_{\text{оп}} := Q_{\text{оп.к}} + Q_{\text{оп.об.}} = 239.599 \text{ кг} \text{ - масса опоры}$$

#### 4.4.5 Определение массы обслуживающих площадок

$$q_{\text{пл}} := 160 \text{ кг}; \text{ Масса одной площадки};$$

$$n_{\text{пл}} := 4 \text{ Количество площадок.}$$

$$Q_{\text{пл}} := q_{\text{пл}} \cdot n_{\text{пл}} = 640 \text{ кг};$$

#### 4.4.6 Определение массы воды при гидротестировании

$$\rho_{\text{в}} := 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$Q_{\text{в}} := \rho_{\text{в}} \cdot [0.785 \cdot D^2 \cdot (H - h - H_{\text{кр}}) + 2 \cdot V] = 7.067 \times 10^3 \text{ кг};$$

#### 4.4.7 Определение максимальной массы аппарата

$$Q_{\text{max}} := Q_{\text{в}} + Q_{\text{оп}} + Q_{\text{т}} + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{кап}} = 1.038 \times 10^4 \text{ кг};$$

#### 4.4.8 Определение минимальной массы аппарата

$$Q_{\text{min}} := Q_{\text{к}} + Q_{\text{оп}} = 2.27 \times 10^3 \text{ кг};$$

## 4.5 Определение расчетных усилий колонного аппарата от ветровых нагрузок [19]

### 4.5.1 При рабочих условиях

### 4.5.2 Определение периода собственных колебаний

$\alpha$  - относительное перемещение центров тяжести участков аппарата

$$\frac{1}{H \cdot m}$$

$E := 1.91 \cdot 10^{11} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$  - модуль продольной упругости материала при температуре 100;

$C_f := 6 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$  - коэффициент упругого сжатия грунта;

$H = 10 \text{ м}$  - высота колонны;

$q_0 := 300 \text{ Па}$  - нормативный напор ветра;

$I := \frac{\pi}{8} \cdot D_{\text{ср}}^3 \cdot (S_1 - C_k) \text{ м}^4$  - момент инерции сечения;

$I_f \text{ м}^4$  - минимальный момент инерции подошвы фундамента.

$g := 9.81$

Аппарат произвольно разбивают на участки с центром масс на расстоянии  $x_i$  от поверхности земли

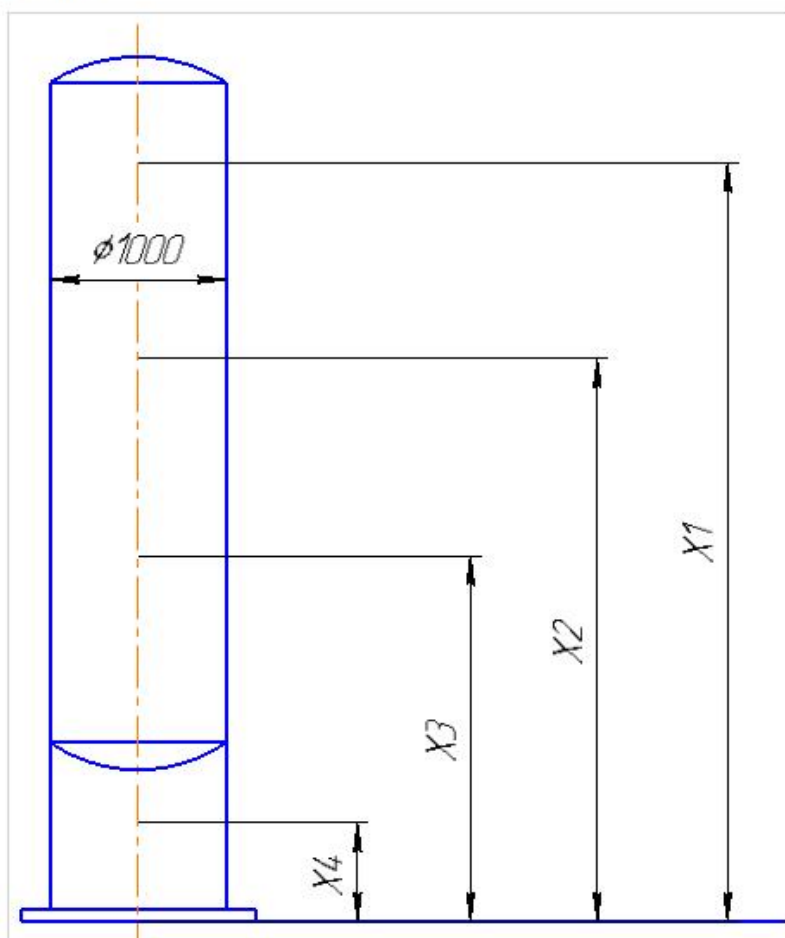


Рисунок 17 - Расчетная схема аппарата

$$x_1 := 6.8 \quad x_2 := 4.2 \quad x_3 := 2.6 \quad x_4 := 0.5$$

$$\beta_1 := \frac{1}{2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{x_1}{H} \right)^2 - \left( \frac{x_1}{H} \right)^3 \right] = 0.536$$

$$\beta_2 := \frac{1}{2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{x_2}{H} \right)^2 - \left( \frac{x_2}{H} \right)^3 \right] = 0.228$$

$$\beta_3 := \frac{1}{2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{x_3}{H} \right)^2 - \left( \frac{x_3}{H} \right)^3 \right] = 0.093$$

$$\beta_4 := \frac{1}{2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{x_4}{H} \right)^2 - \left( \frac{x_4}{H} \right)^3 \right] = 3.688 \times 10^{-3}$$

$$H_2 := 0 \quad I_3 := 0 \quad H_3 := 0 \quad I_2 := 1$$

$$\Delta := \frac{1}{3} + \frac{I}{I_2} \cdot \frac{H_2}{H} \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{H_2}{H} \right)^2 + \frac{H_2}{H} + 1 \right] = 0.333$$

Так как  $I_3=I_2=0$ ,  $H_3=H_2=0$ , то  $\mu=0$  и  $\lambda=0$

$$\lambda := \frac{I}{I_3} \cdot \frac{H_3}{H} \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{H_3}{H} \right) + \frac{H_3}{H} + 1 \right] = \blacksquare$$

$$\mu := \frac{I}{I_3} \cdot \frac{H_3}{H_2} \cdot \left( \frac{H_3}{H_2} + 1 \right)$$

$$I_f := \frac{\pi}{8} \cdot \left( \frac{D_3 + D_1}{2} \right)^3 \cdot \left( \frac{D_3 - D_1}{2} \right) = 0.09$$

$$\gamma := \frac{2}{H^3} \cdot [H^3 \cdot (\Delta)] = 0.667$$

$$\alpha_1 := \gamma \cdot \frac{H}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \beta_1 + \frac{x_1}{H \cdot C_f \cdot I_f} = 1.314 \times 10^{-7}$$

$$\alpha_2 := \gamma \cdot \frac{H}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \beta_2 + \frac{x_2}{H \cdot C_f \cdot I_f} = 8.013 \times 10^{-8}$$

$$\alpha_3 := \gamma \cdot \frac{H}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \beta_3 + \frac{x_3}{H \cdot C_f \cdot I_f} = 4.914 \times 10^{-8}$$

$$\alpha_4 := \gamma \cdot \frac{H}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \beta_4 + \frac{x_4}{H \cdot C_f \cdot I_f} = 9.313 \times 10^{-9}$$

Вес  $i$  - участка, Н:

$$G_1 := 29956 \quad G_2 := 22680 \quad G_3 := 22937 \quad G_4 := 29845$$

Тогда период собственных колебаний

$$G_1 \cdot \alpha_1^2 + G_2 \cdot \alpha_2^2 + G_3 \cdot \alpha_3^2 + G_4 \cdot \alpha_4^2 = 7.204 \times 10^{-10}$$

$$T := 2 \cdot H \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{G_1 \cdot \alpha_1^2 + G_2 \cdot \alpha_2^2 + G_3 \cdot \alpha_3^2 + G_4 \cdot \alpha_4^2}{g \cdot \left( \frac{H \cdot \gamma}{2 \cdot E \cdot I} + \frac{1}{C_f \cdot I_f} \right)}} = 1.219 \quad \text{сек}$$

#### 4.5.2 Определение расчетного изгибающего момента [19]

**Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки на средние  $i$  - го участка аппарата (на высоте  $x_i$  над поверхностью земли)**

$$K := 0.85 \quad \text{аэродинамический коэффициент}$$

$$q_0 := 300 \text{ Па} \quad \text{нормативное значение ветрового давления (2 район)}$$

$\Theta$  коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте аппарата

$$\Theta_1 = \left( \frac{x_1}{10} \right)^{0.31} = 1 \quad \text{Все значения будут равны 1 так как высота колоны менее 10 м}$$

$$\Theta_1 := 1$$

$$\Theta_2 := 1$$

$$\Theta_3 := 1$$

$$\Theta_4 := 1$$

И тогда ветровое давление на участках равно

$$q_{1st} := q_0 \cdot \Theta_1 \cdot K = 255 \quad \text{Па;}$$

$$q_{2st} := q_0 \cdot \Theta_2 \cdot K = 255 \quad \text{Па;}$$

$$q_{3st} := q_0 \cdot \Theta_3 \cdot K = 255 \quad \text{Па;}$$

$$q_{4st} := q_0 \cdot \Theta_4 \cdot K = 255 \quad \text{Па;}$$

#### 4.5.3 Определение средней составляющей ветровой нагрузки на $i$ - м участке

$S_{изол} := 0.05$  - толщина изоляционного слоя, м;

$D_H := D + 2 \cdot S + 2 \cdot S_{изол} = 1.116$  - наружный диаметр аппарата, м.

$h_1 := 6.58 \text{ м}$   $h_2 := 1.82 \text{ м}$   $h_3 := 6.18 \text{ м}$   $h_4 := 3.02 \text{ м}$

Тогда

$$P_{1st} := q_{1st} \cdot D_H \cdot h_1 = 1.873 \times 10^3 \quad \text{Н}$$

$$P_{2st} := q_{2st} \cdot D_H \cdot h_2 = 517.936 \quad \text{Н}$$

$$P_{3st} := q_{3st} \cdot D_H \cdot h_3 = 1.759 \times 10^3 \quad \text{Н}$$

$$P_{4st} := q_{4st} \cdot D_H \cdot h_4 = 859.432 \quad \text{Н}$$

#### Определение коэффициента динамичности ветрового напора

$$\xi := 1.1 + \sqrt{15.5 \cdot \frac{T \cdot \sqrt{q_0}}{790}} = 1.744$$

#### 4.5.4 Коэффициент пульсации давления ветра для середины $k$ - го участка на высоте $x_k$

$$m_{k1} := 0.76 \cdot \left( \frac{x_1}{10} \right)^{-0.15} = 0.805$$

$$m_{k2} := 0.76 \cdot \left( \frac{x_2}{10} \right)^{-0.15} = 0.866$$

$$m_{k3} := 0.76 \cdot \left( \frac{x_3}{10} \right)^{-0.15} = 0.93$$

$$m_{k4} := 0.76 \cdot \left( \frac{x_4}{10} \right)^{-0.15} = 1.191$$

Приведенное относительное ускорение центра тяжести  $i$  - го участка

$\alpha_i :=$	$P_{st_i} :=$	$m_{k_i} :=$	$i := 1..4$
$7.404 \times 10^{-8}$	$4.223 \times 10^3$	0.655	
$5.541 \times 10^{-8}$	$1.069 \times 10^3$	0.684	
$4.232 \times 10^{-8}$	$3.340 \times 10^3$	0.712	
$2.612 \times 10^{-8}$	$1.407 \times 10^3$	0.765	

$$\sum_i (\alpha_i \cdot m_{k_i} \cdot P_{st_i}) = 3.741 \times 10^{-4}$$

$$\alpha_1^2 \cdot G_1 + \alpha_2^2 \cdot G_2 + \alpha_3^2 \cdot G_3 + \alpha_4^2 \cdot G_4 = 7.204 \times 10^{-10}$$

$$\eta_1 := \alpha_1 \cdot \frac{1.996 \cdot 10^{-4}}{7.116 \cdot 10^{-10}} = 0.037 \quad \eta_2 := \alpha_2 \cdot \frac{1.996 \cdot 10^{-4}}{7.116 \cdot 10^{-10}} = 0.022$$

$$\eta_3 := \alpha_3 \cdot \frac{1.996 \cdot 10^{-4}}{7.116 \cdot 10^{-10}} = 0.014 \quad \eta_4 := \alpha_4 \cdot \frac{1.996 \cdot 10^{-4}}{7.116 \cdot 10^{-10}} = 2.612 \times 10^{-3}$$

Коэффициент пространственной корреляции пульсации давления ветра

$$\nu := 0.968 - 0.025 \cdot \sqrt{H} = 0.889$$

#### 4.5.5 Пульсационная составляющая ветровой нагрузки на $i$ - м участке

$$P_{1dim} := \nu \cdot G_1 \cdot \xi \cdot \eta_1 = 1.711 \times 10^3 \quad P_{2dim} := \nu \cdot G_2 \cdot \xi \cdot \eta_2 = 790.068$$

$$P_{3dim} := \nu \cdot G_3 \cdot \xi \cdot \eta_3 = 489.992 \quad P_{4dim} := \nu \cdot G_4 \cdot \xi \cdot \eta_4 = 120.842$$

Тогда ветровая нагрузка на  $i$  - м участке составляет

$$P_1 := P_{1st} + P_{1dim} = 3.583 \times 10^3 \quad P_2 := P_{2st} + P_{2dim} = 1.308 \times 10^3$$

$$P_3 := P_{3st} + P_{3dim} = 2.249 \times 10^3 \quad P_4 := P_{4st} + P_{4dim} = 980.273$$



$x_0$  - высота расчетного сечения аппарата от поверхности земли, м

$$x_{01} := 0 \quad x_{02} := 0.4 \quad x_{03} := 1 \quad x_{04} := 3$$

Расчетный изгибающий момент в сечении на высоте  $x_0$  следует определять по формуле

При  $x_0 = 0$ :

$$P_i := \quad x_i := \quad \Theta := \Theta_1 \quad j := 1..4$$

$P_1$	$x_1$	$x_0 := 0$
$P_2$	$x_2$	
$P_3$	$x_3$	
$P_4$	$x_4$	

$$M_{L0} = \sum_i [P_i \cdot (x_i - x_0)] + \sum_j [K \cdot q_0 \cdot \Theta \cdot (x_j - x_0) \cdot (1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_j \cdot m_j) \cdot A_q]$$

$$M_{L0} := 3.452 \cdot 10^4$$

При  $x_0 = 1$ :

$$x_0 := 1$$

$$M_{L1} = \sum_i [P_i \cdot (x_i - x_0)] + \sum_j [K \cdot q_0 \cdot \Theta \cdot (x_j - x_0) \cdot (1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_j \cdot m_j) \cdot A_q]$$

$$M_{L1} := 3.304 \cdot 10^4$$

#### 4.6 Выбор опор [20]

$$h = \sum_i [P_i \cdot (x_i - x_0)] + \sum_j [K \cdot q_0 \cdot \Theta \cdot (x_j - x_0) \cdot (1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_j \cdot m_j) \cdot A_q]$$

$$h := 3.452 \cdot 10^4$$

Минимальная нагрузка

$$M_1 := 34520 \text{ МН} \cdot \text{м} \quad \text{- изгибающий момент в рабочих условиях;}$$

$$P_1 := 0.12 \text{ МПа} \quad \text{- давление при рабочих условиях;}$$

$$Q_{\min} := \frac{4 \cdot M_1}{D} + P_1 = 1.381 \times 10^5 \text{ Н}$$

Максимально приведенная нагрузка

$$M_2 := 38280 \text{ МН} \cdot \text{м} \quad \text{- изгибающий момент в условиях гидротестирования;}$$

$$P_2 := 0.18 \text{ МПа}$$

$$Q_{\max} := \frac{4 \cdot M_2}{D} + P_2 = 1.531 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

По АТК 24.200.04 при  $D = 1000$  мм и  $Q_{\text{прив. min}} = 128400$  Н тип опоры может быть 2 и 3.

В рассматриваемом случае принимаем опору типа 2 высотой опоры  $H = 1000$  мм, т.е. Опора 2 – 1000 – 0,5 – 0,32 – 1000 АТК 24.200.04

$$D = 1000 \text{ мм}$$

$$D1 = 1012 \text{ мм};$$

$$D2 = 1160 \text{ мм};$$

$$D3 = 1280 \text{ мм};$$

$$d = 50 \text{ мм};$$

$$s1 = 6 \text{ мм};$$

$$s2 = 20 \text{ мм};$$

$$s3 = 20 \text{ мм}.$$

Диаметр резьбы фундаментных болтов М30

Количество фундаментных болтов  $n = 6$  шт.

#### 4.7 Прочностной расчет колонного аппарата [20]

##### 4.7.1 Корпус колонного аппарата

Стенка аппарата должна провериться на прочность и устойчивость.

Проверку прочности следует проводить для рабочего условия

$F1=G1=29956\text{Н}$ ,  $M1=Mv1=36140 \text{ Н*м}$  и для условия монтажа

$F3=G3=54274\text{Н}$ ,  $M3=Mv3=31480 \text{ Н*м}$ ,  $P1=Pr$

Проверку устойчивости следует проводить для рабочего условия

$F1=G1=12125\text{Н}$ ,  $M3=Mv3=31220 \text{ Н*м}$ ,  $P1=Pr$

и условия гидроиспытаний  $F2=G2=24782\text{Н}$ ,  $M2=Mv2=34360 \text{ Н*м}$

##### 4.7.2 Проверка прочности корпуса аппарата при рабочем условии:

$\sigma_x$  Продольные напряжения

$$M_1 := 36140 \quad \text{Нм};$$

$$F_1 := 29956 \quad \text{Н};$$

$$C_K := 1.5 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{\text{исп}} := 120000 \quad \text{Па}.$$

на наветренной стороне, Па

$$\sigma_{x2} := \frac{P_{\text{изб}} \cdot (D + S)}{4 \cdot (S - C_K) \cdot 10^6} - \frac{F_1}{\pi \cdot D \cdot (S - C_K)} - \frac{4 \cdot M_1}{\pi \cdot D^2 \cdot (S - C_K)} = -8.546 \times 10^6$$

Кольцевые напряжения, Па

$$\sigma_y := \frac{P_{\text{изб}} \cdot (D + S)}{2 \cdot (S - C_K)} = 9.305 \times 10^6$$

Эквивалентные напряжения  $\sigma_e$

На наветренной стороне

$$\sigma_{e1} := \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = 8.115 \times 10^6$$

на подветренной стороне

$$\sigma_{e2} := \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = 1.546 \times 10^7$$

Условие прочности

1. На наветренной стороне

$$\max\{|\sigma_{x1}|; \sigma_{e1}\} \leq \sigma_D \cdot \phi$$

$\sigma_D$  допустимое напряжение материала (09Г2С) корпуса аппарата при расчетной температуре, МПа

$$\sigma_D := 165 \text{ МПа} \quad \text{при } t=100$$

Условие выполняется

$$S = 8 \times 10^{-3}$$

2. На подветренной стороне

$$P := 120000$$

$$\max\{|\sigma_{x2}|; \sigma_{e2}\} \leq \sigma_D \cdot \phi$$

$$C_K := 1.5 \cdot 10^{-3}$$

Условие выполняется

### 4.7.3 Проверка прочности корпуса аппарата при условии монтажа

на наветренной стороне, Па  $F_3 := 54274 \text{ Н}$   $M_3 := 31480 \text{ МН}$

$$\sigma_{x1} := \frac{P \cdot (D + S)}{4 \cdot (S - C_K) \cdot 10^6} - \frac{F_3}{\pi \cdot D \cdot (S - C_K)} + \frac{4 \cdot M_3}{\pi \cdot D^2 \cdot (S - C_K)} = 3.509 \times 10^6$$

на подветренной стороне, Па

$$\sigma_{x2} := \frac{P \cdot (D + S)}{4 \cdot (S - C_K) \cdot 10^6} - \frac{F_1}{\pi \cdot D \cdot (S - C_K)} - \frac{4 \cdot M_1}{\pi \cdot D^2 \cdot (S - C_K)} = -8.546 \times 10^6$$

Кольцевые напряжения

$$\sigma_{\phi y} := \frac{P \cdot (D + S)}{2 \cdot (S - C_K)} = 9.305 \times 10^6$$

$\sigma_e$  Эквивалентные напряжения

На наветренной стороне

$$\sigma_{e1} := \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_{\phi y} + \sigma_{\phi y}^2} = 8.139 \times 10^6$$

на подветренной стороне

$$\sigma_{e2} := \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2} \cdot \sigma_{\phi y} + \sigma_{\phi y}^2} = 1.546 \times 10^7$$

Условие прочности

1. На наветренной стороне

$$\max\{|\sigma_{x1}|; \sigma_{e1}\} \leq \sigma_{\text{д}} \cdot \phi$$

допускаемое напряжение материала( 09Г2С) корпуса аппарата при расчетной температуре

$$\sigma_{\text{к}} := 165000000 \quad \text{Па} \quad \text{при } t=100 \text{ градусах цельсия}$$

Условие выполняется

2. На подветренной стороне

$$\max\{|\sigma_{x2}|; \sigma_{e2}\} \leq \sigma_{\text{к}} \cdot \phi$$

Условие выполняется

Проверка устойчивости корпуса аппарата

Проверка устойчивости для рабочих условий и условий гидроиспытаний приводится по формуле

$$\frac{F}{F_d} + \frac{M}{M_d} \leq 1$$

Найдем для начало допускаемое осевое сжимающее усилие

Из условия прочности

$$F_{\sigma} := \pi \cdot (D + S - C_k) \cdot (S - C_k) \cdot \sigma_k = 3.391 \times 10^6 \quad \text{Н}$$

Из условия устойчивости

$$n_y := 1.8$$

$$F_e := \frac{31 \cdot 10^{-2} \cdot E \cdot D^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (S - C_k)}{D} \right]^{2.5}}{n_y} = 1.12 \times 10^{10} \quad \text{Н}$$

$$F_d := \frac{F_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left( \frac{F_{\sigma}}{F_e} \right)^2}} = 3.391 \times 10^6 \quad \text{Н}$$

$$M_{\sigma} := \frac{D}{4} \cdot F_{\sigma} = 8.478 \times 10^5 \quad \text{Н} \cdot \text{м}$$

$$M_e := \frac{D}{3.5} \cdot F_e = 3.201 \times 10^9 \quad \text{Н} \cdot \text{м}$$

$$M_d := \frac{M_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left( \frac{M_{\sigma}}{M_e} \right)^2}} = 8.478 \times 10^5 \quad \text{Н} \cdot \text{м}$$

И так

$$\frac{F_1}{F_d} + \frac{M_1}{M_d} \leq \frac{29956}{3391000} + \frac{36140}{847800} \leq 1$$

Условие выполняется

Для условия гидроиспытания

$$\frac{F_2}{F_d} + \frac{M_2}{M_d} \leq \frac{24782}{3391000} + \frac{34360}{847800} \leq 1$$

#### 4.7.4 Опорная обечайка

Проверку опорной обечайки на прочности и устойчивости следует проводить для рабочего условия  $F_1=G_1=25187\text{Н}$ ,  $M_1=Mv_1=36420\text{ Н*м}$  и для условия гидроиспытаний  $F_2=G_2=36785\text{Н}$ ,  $M_2=Mv_2=0.6*36350\text{ Н*м}$ ,  $P_1=P_{г.и}$

Проверку прочности и устойчивости проводят в сечениях X-X (где идет соединение опоры с обечайкой), Y-Y ( где вентиляция)

#### 4.7.5 Проверка прочности опорной обечайки при рабочем условии

$$F_1 := 2518337 \quad M_1 := 36420$$

$\sigma_x$  Продольные напряжения

на наветренной стороне, Па

$$\sigma_{x1} := \frac{P_{\text{изб}} \cdot (D + S)}{4 \cdot (S - C_K) \cdot 10^6} - \frac{F_1}{\pi \cdot D \cdot (S - C_K)} + \frac{4 \cdot M_1}{\pi \cdot D^2 \cdot (S - C_K)} = -1.162 \times 10^8$$

на подветренной стороне, Па

$$\sigma_{x2} := \frac{P_{\text{изб}} \cdot (D + S)}{4 \cdot (S - C_K) \cdot 10^6} - \frac{F_1}{\pi \cdot D \cdot (S - C_K)} - \frac{4 \cdot M_1}{\pi \cdot D^2 \cdot (S - C_K)} = -1.305 \times 10^8$$

Кольцевые напряжения

$$\sigma_y := \frac{P_{\text{изб}} \cdot (D + S)}{2 \cdot (S - C_K)} = 9.305 \times 10^6 \text{ Н}$$

Эквивалентные напряжения  $\sigma_e$

На наветренной стороне

$$\sigma_{e1} := \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = 1.211 \times 10^8 \text{ Н}$$

на подветренной стороне

$$\sigma_{e2} := \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = 1.354 \times 10^8 \text{ Н}$$

Условие прочности

1. На наветренной стороне

$$\max\{|\sigma_{x1}|; \sigma_{e1}\} \leq \sigma_d \cdot \phi$$

$\sigma_d$  допускаемое напряжение материала (09Г2С) корпуса аппарата при расчетной температуре, МПа

$$\sigma_d := 165 \text{ МПа} \quad \text{при } t=100 \text{ градусах цельсия}$$

Условие выполняется

2. На подветренной стороне

$$\max\{|\sigma_{x2}|; \sigma_{e2}\} \leq \sigma_d \cdot \phi$$

Условие выполняется

#### 4.7.6 Проверка прочности корпуса аппарата при условии монтажа

на наветренной стороне, Па  $F_3 := 50736$   $M_3 := 31490$

$$\sigma_{x1} := \frac{P \cdot (D + S)}{4 \cdot (S - C_K) \cdot 10^6} - \frac{F_3}{\pi \cdot D \cdot (S - C_K)} + \frac{4 \cdot M_3}{\pi \cdot D^2 \cdot (S - C_K)} = 3.684 \times 10^6$$

на подветренной стороне, Па

$$\sigma_{x2} := \frac{P \cdot (D + S)}{4 \cdot (S - C_K) \cdot 10^6} - \frac{F_1}{\pi \cdot D \cdot (S - C_K)} - \frac{4 \cdot M_1}{\pi \cdot D^2 \cdot (S - C_K)} = -1.305 \times 10^8$$

Кольцевые напряжения

$$\sigma_y := \frac{P \cdot (D + S)}{2 \cdot (S - C_K)} = 9.305 \times 10^6$$

Эквивалентные напряжения

$\sigma_e$

На наветренной стороне

$$\sigma_{e1} := \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = 8.116 \times 10^6 \quad \text{Па}$$

на подветренной стороне

$$\sigma_{e2} := \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = 1.354 \times 10^8 \quad \text{Па}$$

Условие прочности

1. На наветренной стороне

$$\max\{|\sigma_{x1}|; \sigma_{e1}\} \leq \sigma_{\text{д}} \cdot \phi$$

допускаемое напряжение материала( 09Г2С) корпуса аппарата при расчетной температуре, МПа

$$\sigma_{\text{д}} := 165 \text{ МПа} \quad \text{при } t=100 \text{ градусах цельсия}$$

Условие выполняется

2. На подветренной стороне

$$\max\{|\sigma_{x2}|; \sigma_{e2}\} \leq \sigma_{\text{к}} \cdot \phi$$

Условие выполняется

#### 4.7.7 Опорная обечайка

Проверку опорной обечайки на прочность и устойчивость следует проводить для рабочего условия  $F_1=G_1=23936\text{Н}$ ,  $M_1=M_{v1}=32110 \text{ Н*м}$  и для условия гидроиспытаний  $F_2=G_2=32685\text{Н}$ ,  $M_2=M_{v2}=0.6*34360 \text{ Н*м}$ ,  $P_1=P_{г.и}$

Проверку прочности и устойчивости проводят в сечениях X-X (где идет соединение опоры с обечайкой), Y-Y ( где вентиляция)

Проверка прочности опорной обечайки при рабочем условии

$\sigma_{\text{х}}$  Продольные напряжения

$$M_1 := 32110 \quad F_1 := 23936 \quad P = 1.2 \times 10^5$$

на наветренной стороне, Па

$$\sigma_{x1} := \frac{P \cdot (D + S)}{4 \cdot (S - C_{\text{к}}) \cdot 10^6} - \frac{F_1}{\pi \cdot D \cdot (S - C_{\text{к}})} + \frac{4 \cdot M_1}{\pi \cdot D^2 \cdot (S - C_{\text{к}})} = 5.118 \times 10^6$$

на подветренной стороне, Па

$$\sigma_{x2} := \frac{P \cdot (D + S)}{4 \cdot (S - C_{\text{к}}) \cdot 10^6} - \frac{F_1}{\pi \cdot D \cdot (S - C_{\text{к}})} - \frac{4 \cdot M_1}{\pi \cdot D^2 \cdot (S - C_{\text{к}})} = -7.462 \times 10^6$$

Кольцевые напряжения

$$\sigma_{\text{у}} := \frac{P \cdot (D + S)}{2 \cdot (S - C_{\text{к}})} = 9.305 \times 10^6$$



Эквивалентные напряжения  $\sigma_e$

На наветренной стороне

$$\sigma_{e1} := \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = 8.071 \times 10^6$$

на подветренной стороне

$$\sigma_{e2} := \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = 1.455 \times 10^7$$

Условие прочности

1. На наветренной стороне

$$\max\{|\sigma_{x1}|; \sigma_{e1}\} \leq \sigma_d \cdot \phi$$

$\sigma_d$  допустимое напряжение материала( 09Г2С) корпуса аппарата при расчетной температуре, МПа;

$$\sigma_d := 196 \text{ МПа} \quad \text{при } t=20;$$

Условие выполняется

2. На подветренной стороне

$\sigma_x$

$$\max\{|\sigma_{x2}|; \sigma_{e2}\} \leq \sigma_d \cdot \phi$$

Условие выполняется

#### 4.7.8 Расчет и укрепление отверстий в корпусе колонны [18]

1. На наветренной стороне

$$\max\{|\sigma_{x1}|; \sigma_{e1}\} \leq \sigma_d \cdot \phi$$

$\sigma_d$  - допустимое напряжение материала( 09Г2С) корпуса аппарата при расчетной температуре, МПа;

$$\sigma_d := 196 \text{ МПа} \quad \text{при } t=20 \text{ градусах цельсия.}$$

Условие выполняется

2. На подветренной стороне

$$\max\{|\sigma_{x2}|; \sigma_{e2}\} \leq \sigma_d \cdot \phi$$

Условие выполняется

#### 4.7.9 Проверка прочности сварного шва, соединяющего корпус аппарата с опорной обечайкой (сечение X-X)

$a := 0.01 \text{ м}$  - катет сварного шва в месте приварки опорной обечайки;

$\sigma_0 := 196 \text{ МПа}$  - допустимое напряжение материала опорной обечайки при расчетной температуре;

$\sigma_k = 165$  МПа - допускаемое напряжение материала корпуса аппарата при расчетной температуре.

$$\frac{1}{\pi \cdot D \cdot a} \cdot \left( \frac{4 \cdot M_1}{D} + F_1 \right) \leq 0.8 \cdot \min\{196; 165\}$$

$$7.539 \times 10^6 \leq 0.8 \cdot 165$$

Условие выполняется

При условии гидроиспытании

$$\frac{1}{\pi \cdot D \cdot a} \cdot \left( \frac{4 \cdot M_2}{D} + F_2 \right) \leq 0.8 \cdot \min\{196; 165\}$$

$$2.764 \times 10^6 \leq 0.8 \cdot 165$$

Условие выполняется

Проверка устойчивости опорной обечайки в зоне отверстий (X-X) при рабочем условии

$$\varphi_1 := 0.96 \quad \varphi_2 := 0.83 \quad \varphi_3 := 0.05 \quad F_Y := 11949 \quad M_Y := 3139$$

$$\frac{F_Y}{\varphi_1 \cdot F_d} + \frac{M_Y + F_Y \cdot \varphi_3 \cdot D_3}{M_d \cdot \varphi_2} \leq 1 \quad F_d := 16159000 \quad M_d := 5650000$$

Условие выполняется

Расчет и укрепление отверстий в эллиптическом днище колонного аппарата

В корпусе колонны находятся 3 люка - лазов с  $D_y=400$  мм, штуцер для входа жидкости в колонну  $D_y=80$  мм, штуцер для выхода жидкости  $D_y=150$  мм, для входа и выхода газа  $D_y=500$  мм.

Расчетный диаметр укрепляемого элемента

$$D_p := D$$

Расчетный диаметр круглого отверстия штуцера

$$d_1 := 0.4$$

$$d_2 := 0.08$$

$$d_3 := 0.15$$

$$\sigma_{\text{кв}} := 165000000 \text{ Па}$$

$$d_{p1} := d_1 + 2 \cdot C_K = 0.403 \text{ м}$$

$$d_{p2} := d_2 + 2 \cdot C_K = 0.083 \text{ м}$$

$$d_{p3} := d_3 + 2 \cdot C_K = 0.153 \text{ м}$$

Расчетная толщина стенки укрепляемой оболочки

$$S_p := \frac{P_{\text{изб}} \cdot D}{2 \cdot \sigma_K \cdot \phi - P_{\text{изб}}} = 3.638 \times 10^{-4} \text{ м}$$

Наибольший диаметр, не требующий дополнительного укрепления для цилиндрических обечаек

$$d_0 := 2 \cdot \left[ \left( \frac{S - C_K}{S_p} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (S - C_K)} - C_K \right] = 2.749$$

Условие  $d_p < d_0$  выполняется и дополнительное укрепление отверстия для люка - лаза не требуется

$$d_{p1} \leq d_0$$

$$d_{p2} \leq d_0$$

$$d_{p3} \leq d_0$$

Все условия выполняются и доп. укрепления не требуется.

#### 4.8 Выбор конструкции фланца [18]

Для конструкции соединения крышки с корпусом выбираем фланец плоский приварной с уплотнительной поверхностью типа "выступ - впадина" и прокладкой из материала паронит. По ГОСТ 28759.2-90 подбираем размеры фланца (исполнение 11)

$$D_{\text{ф}} := 1.26 \text{ м}; \quad H := 0.16 \text{ м};$$

$$D_6 := 1.2 \text{ м};$$

$$D_1 := 1.14 \text{ м};$$

$$D_2 := 1.105 \text{ м};$$

$$D_3 := 1.066 \text{ м};$$

$$h_{\text{ф}} := 0.008 \text{ м};$$

$$a := 65$$

$$a_1 := 12$$

$$s := 0.012$$

$$d := 0.023 \quad \text{диаметр отверстия под фундаментный болт;}$$

$$z := 44 \quad \text{число отверстий.}$$

$$F_{\text{болт}} := 0.000201 \quad \text{площадь сечения болта, м}^2;$$

Болтовая нагрузка, необходимая для обеспечения герметичности соединения определяется исходя из схемы нагружения. Расчет сводится к определению нагрузок для двух различных состояний: при монтаже и в рабочих условиях

#### 4.9 Болтовая нагрузка в условиях монтажа

$k_{\text{ж}}$  коэффициент жесткости фланцевого соединения

Для определения  $k_{\text{ж}}$  вычисляются предварительно следующие вспомогательные величины

$$h_{\text{п}} := 0.002 \quad \text{м} \quad - \text{толщина прокладки;}$$

$$k_{\text{п}} := 1 \quad - \text{коэффициент обжатия прокладки;}$$

$$E_{\text{п}} := 2000 \quad \text{МПа} \quad - \text{модуль упругости материала прокладки;}$$

$$D_1 = 1.14 \quad \text{м} \quad - \text{средний диаметр прокладки;}$$

$$b := 0.015 \quad \text{м} \quad - \text{ширина прокладки.}$$

а) Линейная податливость фланца

$$y_{\text{п}} := \frac{k_{\text{п}} \cdot h_{\text{п}}}{E_{\text{п}} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot b} = 1.861 \times 10^{-5} \quad \text{м/МН}$$

б) Угловая податливость фланца

$\nu, \lambda_{\text{ф}}$  безразмерные параметры

$$s_0 := 0.01 \quad \text{м}$$

$$h_{\text{в}} := H - 0.015 = 0.145$$

$$s_{\text{ЭКВ}} := s_0 \cdot \left[ 1 + \frac{h_{\text{в}} \cdot (\beta_1 - 1)}{h_{\text{в}} + 0.25 \cdot (\beta_1 + 1) \cdot \sqrt{D \cdot s_0}} \right] = 6.335 \times 10^{-3}$$

$$\lambda_{\text{ф}} := \frac{h_{\text{ф}}}{\sqrt{D \cdot s_{\text{ЭКВ}}}} = 0.101$$

$$\psi_1 := 1.28 \cdot \log\left(\frac{D_{\text{ф}}}{D}\right) = 0.128$$

$$\psi_2 := \frac{D_\phi + D}{D_\phi - D} = 8.692$$

$$\nu := \frac{1}{1 + 0.9 \cdot \lambda_\phi \cdot \left(1 + \psi_1 \cdot \frac{h_\phi^2}{s_{\text{ЭКВ}}}\right)} = 0.917$$

Тогда угловая податливость фланца равна

$E := 200000$  МПа - модуль упругости материала

$$y_\phi := \frac{\left[1 - \nu \cdot (1 + 0.9 \cdot \lambda_\phi)\right] \cdot \psi_2}{h_\phi^3 \cdot E} = 9.139 \times 10^{-3}$$

в) Линейная податливость болтов

$l_{\text{б.о.}} := 2 \cdot (h_\phi + h_\Pi) = 0.02$  расстояние между опорными поверхностями головки болта и гайки

$l_\phi := l_{\text{б.о.}} + 0.28 \cdot d = 0.026$  расчетная длина болта

$f_\phi := 4.684 \cdot 10^{-4}$  площадь поперечного сечения болта по внутреннему диаметру резьбы

$$y_\phi := \frac{l_\phi}{E \cdot f_\phi \cdot z} = 6.414 \times 10^{-6} \quad \frac{\text{м}}{\text{МН}}$$

Тогда коэффициент жесткости фланцевого соединения составляет

$$k_{\text{ж}} := \frac{y_\phi + 0.5 \cdot y_\phi \cdot (D_\phi - D - s_{\text{ЭКВ}}) \cdot (D_\phi - D_1)}{y_\Pi + y_\phi + 0.5 \cdot y_\phi \cdot (D_\phi - D_1)^2} = 1.435$$

Определим равнодействующую внутреннего давления  $F_d$  и реакция прокладки  $R_p$

$P_p := 0.12$  МПа

$$F_{\text{д}} := \frac{P_p \cdot \pi \cdot D_1^2}{4} = 0.122 \quad \text{МН}$$

$k_{\text{пр}} := 2.5$  коэффициент, зависящий от материала и конструкции прокладки

$b_0 := b$

$$R_{\Pi} := \pi \cdot D_1 \cdot b_0 \cdot k_{\text{пр}} \cdot P_p = 0.016 \quad \text{МН}$$

$$F := 50736$$

$$M := 31490$$

Болтовая нагрузка в условиях монтажа до подачи внутреннего давления

$$F_{\text{б1}} = \max \left\{ \frac{k_{\text{ж}} \cdot F_{\text{д}} + R_{\Pi}}{0.5 \pi \cdot D_1 \cdot b_0} \right\} \quad \max \{0.408\}$$

$$k_{\text{ж}} \cdot (F_{\text{д}}) + R_{\Pi} = 0.192 \quad F_{\text{б1}} := 0.408$$

$$0.5 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot b_0 = 0.027$$

Болтовая нагрузка в рабочих условиях

$$t_{\phi} := 50 \quad \text{градусов цельсия;}$$

$$t_{\text{б}} := 50 \quad \text{градусов цельсия;}$$

$$\alpha_{\phi} := 12.5 \cdot 10^{-6} \quad \text{коэффициент линейного расширения материала фланца;}$$

$$\alpha_{\text{б}} := 12.2 \cdot 10^{-6} \quad \text{коэффициент линейного расширения материала болтов.}$$

$$F_t := \frac{y_{\text{б}} \cdot z \cdot f_{\text{б}} \cdot E \cdot (\alpha_{\phi} \cdot t_{\phi} - \alpha_{\text{б}} \cdot t_{\text{б}})}{y_{\Pi} + y_{\text{б}} + 0.5 \cdot y_{\phi} \cdot (D_{\text{б}} - D_1)^2} = 9.561 \times 10^{-3} \quad \text{МН}$$

$$F_{\text{б2}} := F_{\text{б1}} + (1 - k_{\text{ж}}) \cdot F_{\text{д}} + F_t = 0.364$$

#### 4.9.1 Условие прочности болтов [18]

$$\frac{F_{\text{б1}}}{z \cdot f_{\text{б}}} \leq \sigma_{\text{д20}} \quad \sigma_{\text{д20}} := 196 \quad \text{МН} \quad \frac{F_{\text{б2}}}{z \cdot f_{\text{б}}} \leq \sigma_{\text{дб}} \quad \sigma_{\text{дб}} := 165 \quad \text{МН}$$

$$\frac{F_{\text{б1}}}{z \cdot f_{\text{б}}} = 19.797$$

$$\frac{F_{\text{б2}}}{z \cdot f_{\text{б}}} = 17.677$$

где  $\sigma_{\text{дб}}$  это допускаемое напряжение болтов при расчетной температуре

Условие выполняется

Условие выполняется

#### 4.9.2 Условие прочности неметаллических прокладок [18]

$$\frac{F_{\text{бmax}}}{\pi \cdot D_1 \cdot b} \leq P_{\text{прд}} \quad P_{\text{пр.д.}} := 130 \quad \text{МПа}$$

где  $F_{\sigma_{\max}} := F_{62}$

$$\frac{F_{\sigma_{\max}}}{\pi \cdot D_1 \cdot b} = 6.781$$

Условие выполняется

#### 4.9.3 Условие прочности втулки фланца для сечения, ограниченного размером $s_1$

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_k^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_k} \leq \sigma_{д1}$$

$$T_{\phi} := \frac{D_{\phi}^2 \cdot \left( 1 + 8.55 \cdot \log \left( \frac{D_{\phi}}{D} \right) \right) - D^2}{\left( 1.05 \cdot D^2 + 1.945 \cdot D_{\phi}^2 \right) \cdot \left( \frac{D_{\phi}}{D} - 1 \right)} = 1.813$$

$$M_0 \max = \left\{ \begin{array}{l} 0.5 \cdot (D_6 - D_1) \\ 0.5 \cdot ((D_6 - D_1) \cdot F_{62} + (D_1 - D - s_{\text{ЭКВ}}) \cdot F_{д}) \cdot \sigma_{20д} / \sigma_{д} \end{array} \right\}$$

$$0.5 \cdot (D_6 - D_1) = 0.03$$

$$0.5 \cdot \left[ (D_6 - D_1) \cdot F_{62} + (D_1 - D - s_{\text{ЭКВ}}) \cdot F_{д} \right] \cdot \frac{\sigma_{д20}}{\sigma_{д}} = 0.019$$

Берем  $M_0 := 0.038$

Максимальное напряжение в кольце фланца

$$\sigma_{kk} := M_0 \cdot \left[ 1 - \nu \cdot (1 + 0.9 \cdot \lambda_{\phi}) \right] \cdot \frac{\psi_2}{D \cdot h_{\phi}^2} = 0.556$$

$$\sigma_1 := \frac{T_{\phi} \cdot M_0 \cdot \nu}{1.41 \cdot 0.01} = 4.479$$

Тогда

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_k^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_k} = 4.229 \text{ МПа}$$

Условие выполняется

#### 4.9.4 Условие прочности втулки фланца для сечения, ограниченного размером $s_0$

Максимальное напряжение в сечении, ограниченном размером  $s_0$

$$f_{\phi} := 1$$

$$\sigma_{\phi 0} := f_{\phi} \cdot \sigma_1 = 4.479$$

$$P_{\phi} := 120000$$

Тангенциальное напряжение

$$\sigma_t := \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot (s_0 - C_k)} = 7.059 \times 10^6 \quad \text{Па}$$

$$s_0 = 0.01$$

$$D = 1$$

Меридиональное напряжение

$$\sigma_m := \frac{P_p \cdot D}{4(s_0 - C_k)} = 3.529 \times 10^6 \quad \text{Па}$$

$$\sigma_{0д} := 0.003 \cdot E = 600$$

$$\sqrt{(\sigma_0 + \sigma_m)^2 + \sigma_t^2 - (\sigma_0 + \sigma_m)\sigma_t} \leq \varphi \cdot \sigma_{0д}$$

$$\sqrt{(\sigma_0 + \sigma_m)^2 + \sigma_t^2 - (\sigma_0 + \sigma_m)\sigma_t} = 6.113 \times 10^6$$

Условие выполняется

#### 4.9.5 Условие прочности [18]

$$M.01 \max = \left\{ \begin{array}{l} 0.5 \cdot (D_6 - D_{s1}) \cdot F_{61} \\ 0.5 \cdot ((D_6 - D_{s1}) \cdot F_{62} \cdot \sigma_{20т.с} / \sigma_{т.с}) \end{array} \right\}$$

$$\sigma_{20т.с} := 280 \quad \sigma_{т.с} := 222$$

$$0.5 \cdot (D_6 - D_1) \cdot F_{62} \cdot \frac{\sigma_{20т.с}}{\sigma_{т.с}} = 0.014$$

$$0.5 \cdot (D_6 - D_1) \cdot F_{61} = 0.012$$

Берем  $M_0 := 0.014$

$$\sigma_c := \frac{M_0 \cdot (D_\phi - D)}{D \cdot h^2 \cdot (D_\phi - D)} = 1.175 \times 10^{-11} \quad \text{МПа}$$

Условие выполняется

#### 4.9.6 Требования к углу поворота

$$\theta := \frac{\sigma_k}{E} \cdot \frac{D}{h_\phi} = 3.473 \times 10^{-4}$$

допускаемый угол  
поворота

$$\theta_d := 0.009$$

Условие выполняется



## **Заключение**

В выпускной квалификационной работе выполнен анализ аппаратного оформления проекта моноэтаноламиновой очистки от сероводорода жирного газа КК-1 и АВТ. Отмечены следующие недостатки существующего оборудования:

- сложность
- низкая интенсивность, громоздкость
- высокая чувствительность к колебаниям нагрузок по газу и жидкости.

С целью устранения выявленных недостатков предложен компактный и высокоэффективный аппарат с подвижной кольцевой насадкой (АПКН).

Выполнено экспериментальное исследование гидродинамических характеристик АПКН при различных плотностях орошения в широком диапазоне нагрузок по газу с кольцевой насадкой 40x20x2,5 мм.

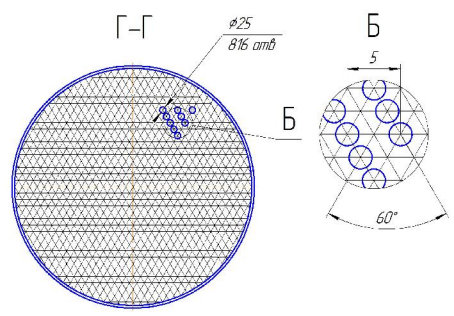
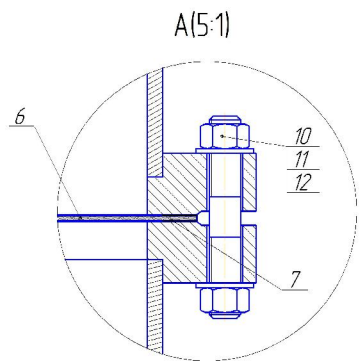
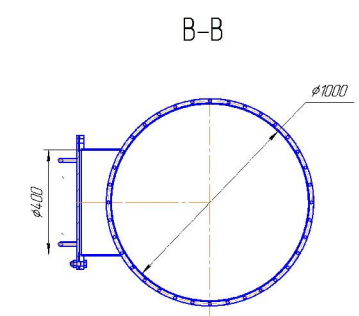
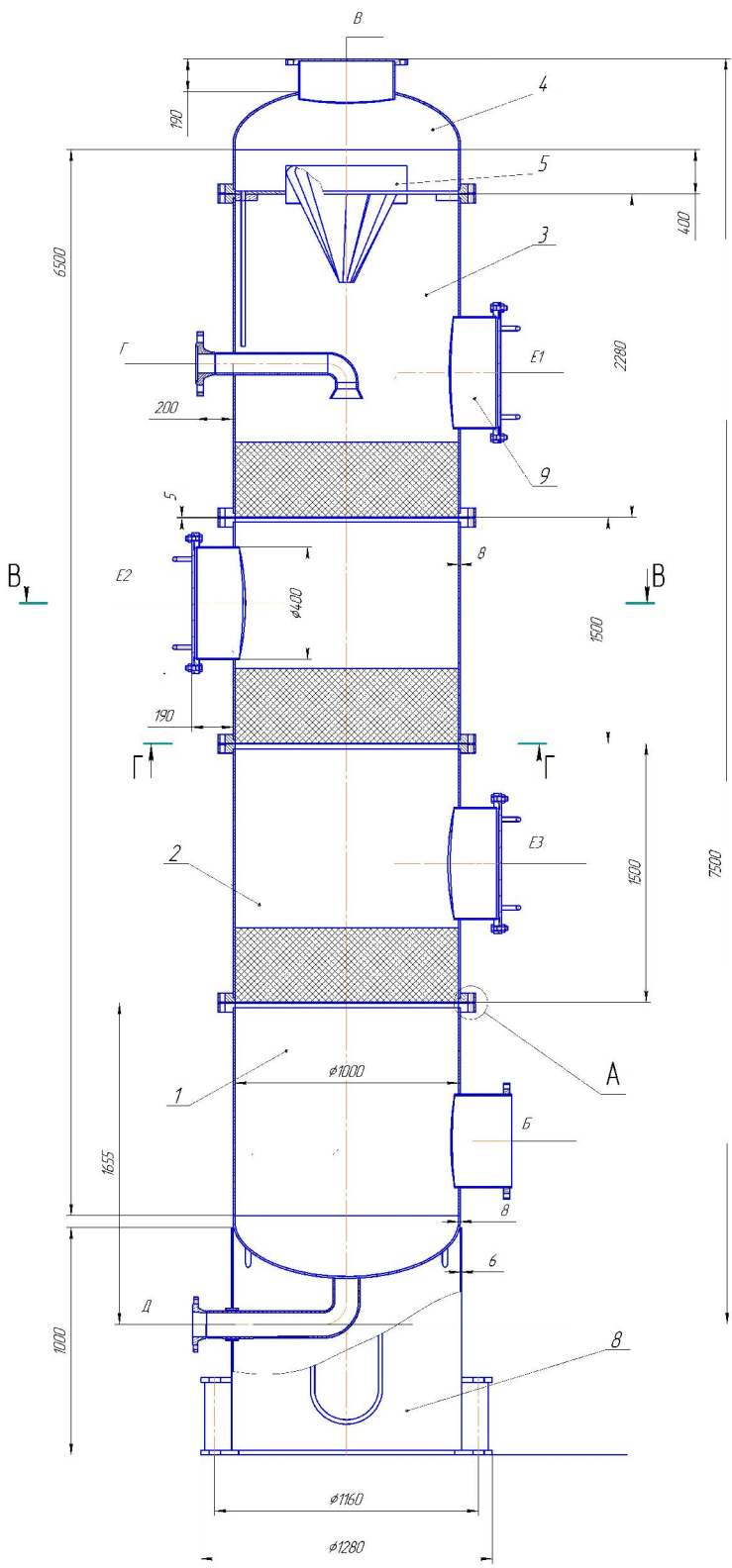
Результаты исследований использованы при проектировании абсорбера для очистки газов от сероводорода раствором моноэтанолamina.

## Список использованных источников

1. Замянин А.А., Рамм В.М. Абсорберы с псевдооживленной насадкой. М.: Химия, 1976 – 187 с.
2. Интенсивные колонные аппараты для обработки газов жидкостями / под ред. Э.Я. Тарата. – Л.:Изд-во ЛГУ, 1976. – 240 с.
3. Гельперин Н.И. Исследование работы абсорбционного аппарата с псевдооживленным слоем орошаемой шаровой насадки // Химическое и нефтяное машиностроение. -1996. - №1. – С. 22 – 26.
4. Аппарат с «зажатыми» кипящими слоями: а.с. 144830 СССР / Живайкин Л.Я., Бляхер И.Г. – 730101/23; заявл. 11.05.1961; опубл. 01.01.1962, Бюл. №4. – 2 с.
5. Полая шаровая насадка: а.с. 264343 СССР / Гельперин Н.И., Аэров М.Э., Аксельрод Л.С., Быстрова Т.А., Саевский В.В. – 1088904/23-26; заявл. 02.07.1966; опубл. 03.03.1970, Бюл. №9. – 2 с.
6. Бляхер И.Г., Живайкин Л.Я., Юровская Н.А. Исследование гидродинамики и массообмена в аппаратах с подвижной насадкой // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1967. – №2. – С. 18-22.
7. Гельперин Н.И., Кругляков Б.С. Гидравлические характеристики колонны с псевдооживленной орошаемой шаровой насадкой // Химическая промышленность. – 1977. – №11. – С. 66-68.
8. Балабеков О.С., Тарат Э.Я., Романков П.Г. Гидравлический расчет аппаратов с орошаемой взвешенной шаровой насадкой // Журнал прикладной химии. – 1971. – Т. 44, №5. – С. 1061-1068.
9. Подвижная насадка абсорбера: а.с. 212988 СССР / Левш И.П., Крайнев Н.И. - № 1092737/23-26; заявл. 20.01.1966, опубл 12.03.1968, Бюл. №10. -2 с.
10. Левш И.П., Ниязов М.И., Хаитмухамедов К.И. Исследование гидродинамики псевдооживленного слоя орошаемой насадки из полимерных колец // Сб. науч. Тр. Ташкент. Политехн. Ин-т. – 1972. – Вып. 90. – С. 183-186.

11. Крайнев Н.И. Исследование гидродинамики и массообмена в аппаратах с псевдооживленным слоем кольцевой насадки: дис. канд. техн. наук / Ташкент. политехн. ин-та. – Ташкент, 1968. – 130 с.
12. Козак Ф.В. Исследование гидродинамики и массообмена в аппарате с псевдооживленным слоем насадки: автореф. дис. канд. техн. наук / Одес. политехн. ин-т. – Одесса, 1972. – 24 с.
13. Адлер Ю.П., Макарова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
14. Мошев Е.Р. Моделирование химико-технологических процессов: учеб. пособие / перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2006. – 98 с.
15. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Metallurgy, 1968. – 155 с.
16. Технологический регламент ГФУ, ТР 21-056-2016. 169 с.
17. Рамм В.М. Абсорбция газов. Издательство М.: Химия, 1976 – 656 с.
18. Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического оборудования. Справочник 2-е изд. перераб. и доп. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой 2002 – 1030 с.
19. Лащинский А.А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. – М.-Л.: Машиностроение, 1981.
20. ГОСТ 14289-89 Сосуды и аппараты. Нормы и метода расчета на прочность.- М.: Изд-во стандартов, 1989.
21. Балабеков О.С. Очистка газов в химической промышленности. Москва: Химия, 1991 – 256 с.
22. Головачевский Ю.А. Оросители и форсунки скрубберов химической промышленности. М., «Машиностроение», 1974 – 271 с.

**Приложение А (Обязательное) Графическая часть проекта**



**Техническая характеристика**

1. Абсорбер предназначен для очистки серосодержащих газов с установок АВТ и КК
2. Производительность  $\text{м}^3/\text{ч}$  9000
3. Среды в аппарате агрессивная, небрызгоопасная, нежароопасная
4. Содержание сероводорода в поступающем газе  $\text{H}_2\text{S} - 0.02\%$
5. Расчетное давление в аппарате:
  - на входе, Па 120000
  - на выходе, Па 132000
  - в корпусе, Па 1729
6. Гидравлическое сопротивление, Па
7. Температура:
  - на входе,  $^{\circ}\text{C}$  45
  - на выходе,  $^{\circ}\text{C}$  40
  - на стенке корпуса,  $^{\circ}\text{C}$  45
8. Расход абсорбционного раствора на орошение,  $\text{м}^3/\text{ч}$  18,2
9. Температура абсорбционного раствора,  $^{\circ}\text{C}$  45
10. Основной материал аппарата - сталь 09Г2С
11. Насадка кольца пластмассовые (полипропилен)  $40 \times 20 \times 25 \text{ мм}$

Таблица шлицеров

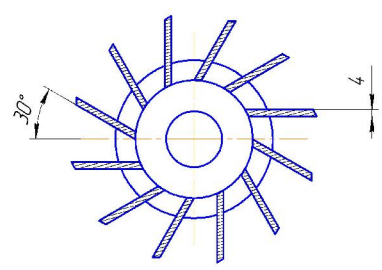
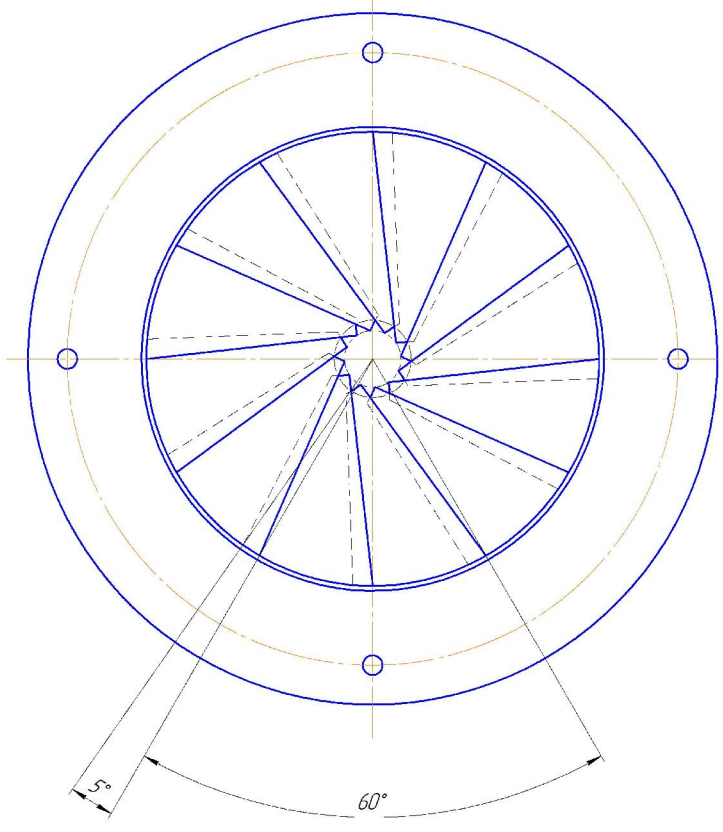
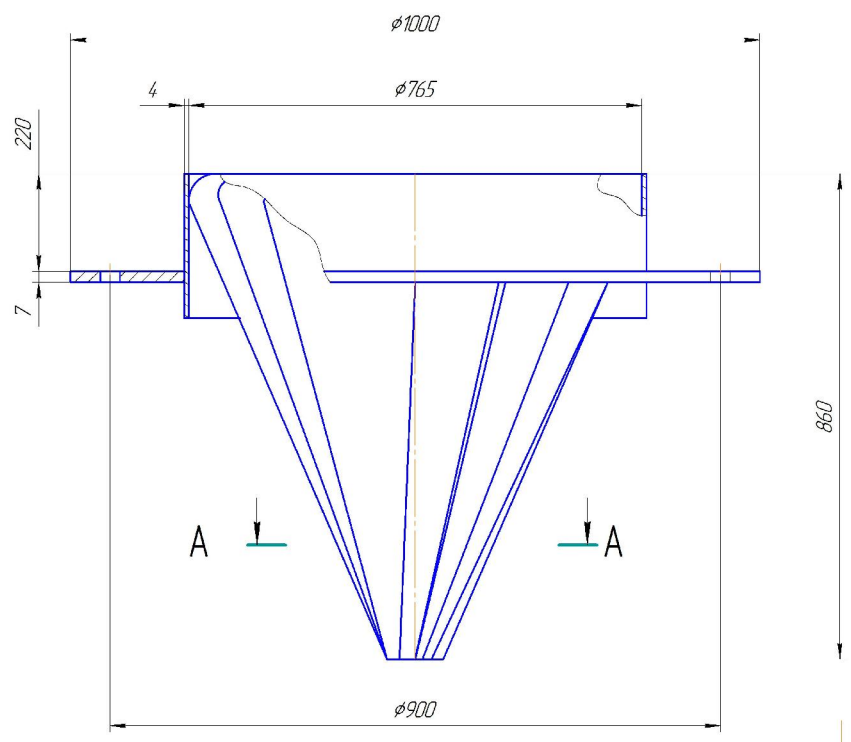
Обозн	Наименование	Кол	Условный диаметр Ду, мм	Условное давление Ру, МПа
Б	Вход газа	1	500	0,25
В	Выход газа	1	500	0,25
Г	Вход раствора	1	80	0,6
Д	Выход раствора	1	150	0,25
Е1-Е3	Лик-лаз	3	400	0,25

**Технические требования**

1. Изготовление, испытание, поставку и приемку аппарата производить по ОСТ 25-291-79 "Сосуды и аппараты стальные сварные. Технические требования". ГОСТ 24444-87 "Оборудование технологические. Общие монтажно-технологические требования".
2. Аппарат неподвижен ГОСТРТЕХНАДЗОРЧ.

ВКР.01.00.00.СБ				Лист	Масса	Масштаб
Исполн	М.В.Винни	Проф	Лист	Абсорбер с подвижной насадкой		
Провер	Григорьев А.А.	Инж	Лист			
Утвержд	Удальцев А.И.	Инж	Лист			
Инженер	Иванов В.И.	Инж	Лист			
				Лист	Масса	Масштаб
				110		
				Лист	Листов	7
				ПНМТУ МАХП-18-1м		
				Копировать		
				Формат А1		

ВКР.02.05.00.СБ



Испол. №	Лист	№ докум.	Лист	№ докум.	Лист	№ докум.	Лист	№ докум.	Лист	№ докум.	Лист

				ВКР.02.05.00.СБ			
Изм.	Лист	№ докум.	Лист	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
							1:10
Разраб.				Коплеуловитель			
Проб.							
Т.контр.							
Н.контр.							
Эпол.							
						Лист	Листов
						1	1
						ПНИПУ МАХП-18-1м	
						Формат А2	

Копирован