

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»

(наименование)

18.03.01 Химическая технология

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Химическая технология органических и неорганических веществ

(направленность (профиль) / специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Оптимизация стадии гранулирования аммиачной селитры

Обучающийся

А.А. Демидов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Ю.В. Чариков

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

## Аннотация

Бакалаврскую работу выполнил студент группы ХТбз-1802а: Демидов Андрей Аркадьевич.

Тема бакалаврской работы: «Оптимизация стадии гранулирования аммиачной селитры».

Научный руководитель бакалаврской работы: Чариков Юрий Викторович.

Цель бакалаврской работы – увеличение производительности стадии гранулирования аммиачной селитры в летнее время до 1700 т./сут.

Бакалаврская работа состоит из 62 страниц, 4 таблиц, 10 иллюстраций, а также имеется графическая часть. В работе рассчитан тепловой баланс и конструктивный расчет аппарата обработки воздуха, а также выполнен расчет защитного циркуляционного ресивера, аммиачные горизонтальные центробежные насосы и вертикальный гравитационный сепаратор.

Объектом исследования является цех №3 химического предприятие ПАО «КуйбышевАзот» с подробным описанием используемого оборудования, которое применяется на сегодняшний день.

## Содержание

Введение.....	4
1 Теоретическая часть.....	6
1.1 Аммиачная селитра, структурная формула, применение в сельском хозяйстве и промышленности, анализ рынка аммиачной селитры.....	6
1.2 Общие сведения предприятия ПАО «КуйбышевАзот».....	11
1.3 Характеристика цеха № 3 предприятия ПАО «КуйбышевАзот».....	12
1.4 Недостатки стадии гранулирования аммиачной селитры.....	16
1.5 Патентный поиск.....	17
2 Технологическая часть.....	20
2.1 Описание промышленной площадки цеха № 3.....	20
2.2 Описание оптимизационной установки системы охлаждения атмосферного воздуха.....	21
2.3 Область применения и назначение изделия аппарата охлаждения воздуха.....	27
2.4 Техническая характеристика аппарата обработки воздуха (АОВ).....	28
2.5 Описание конструкции аппарата обработки воздуха (АОВ).....	29
3 Расчетная часть.....	32
3.1 Расчет аппарата обработки воздуха.....	32
3.1.1 Тепловой расчет аппарата обработки воздуха.....	32
3.2 Расчет геометрического объема циркуляционного защитного ресивера.....	44
3.3 Расчет аммиачного циркуляционного насоса для холодильной установки.....	44
3.4 Расчет вертикального гравитационного сепаратора.....	45
Заключение.....	53
Список используемой литературы и используемых источников.....	55

## Введение

На сегодняшний день самым важным критерием при производстве аммиачной селитры на стадии гранулирования является температурный режим воздуха, который подается в грануляционную башню. Рассматриваемая проблема приводит к меньшей производительности установки в летнее время, снижая при этом проектную нагрузку по подаче воздуха. Оптимальная входная температура наружного воздуха в грануляционную башню должна составлять около 15°C. В нашем регионе температура наружного воздуха в период с июня по сентябрь составляет 20-35°C. Решить данную проблему с температурным режимом воздуха возможно с применением новых технологий, которые применяются в циркуляционных аммиачных установках на стадии гранулирования аммиачной селитры.

В циркуляционных аммиачных установках применяется хладагент в виде жидкого аммиака, который имеет высокую теплоту испарения, относительно других используемых хладагентов. К положительным характеристикам жидкого аммиака в качестве хладагента является его негорючесть, а также он не взрывоопасен.

Объектом исследования выступает технологическая схема стадии гранулирования аммиачной селитры цеха № 3 предприятия ПАО «КуйбышевАзот». Проектная производительность должна составлять 1700 т./сут. за весь год, но из-за температурного режима воздуха в период с июня по сентябрь производительность упала на 200 т./сут. Общее сокращение производимой аммиачной селитры в год составило 144 000 т.

Предметом исследования является стадия гранулирования аммиачной селитры.

Цель выпускной квалификационной работы заключается в повышении проектной производительности до 1700 т./сут. в период с мая по октябрь.

Для достижения поставленной цели будут решаться следующие задачи:

- изучить недостатки существующего процесса гранулирования аммиачной селитры в технологической схеме цеха № 3 предприятия ПАО «КуйбышевАзот»;

- оптимизировать существующую стадию гранулирования, которая будет направлена на повышение производительности согласно патентному поиску;

- привести конструктивные расчеты применяемого нового оборудования.

Методологической и теоретической основой выпускной квалификационной работы являются исследования авторов Барулина А. Е., Лашутиной Н. Г., Верховой Т. А., Суедова В. П., Кисс В.В. и Евдокимова А.А.

Современное научное исследование заключается в изучении патентных изобретений, которые способны увеличить производительность аммиачной селитры на стадии гранулирования.

Теоретическая значимость исследования заключается в повышении производительности установки гранулирования аммиачной селитры в летний период.

## 1 Теоретическая часть

### 1.1 Аммиачная селитра, структурная формула, применение в сельском хозяйстве и промышленности, анализ рынка аммиачной селитры

Аммиачная селитра (нитрат аммония) – это химическое соединение, которое используется в качестве основного удобрения и в качестве подкормки. Имеет в своем составе 34,4% азота. Нитрат аммония имеет химическую формулу –  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . Брутто формула аммиачной селитры –  $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$ . На рисунке 1 показана структурная формула аммиачной селитры.

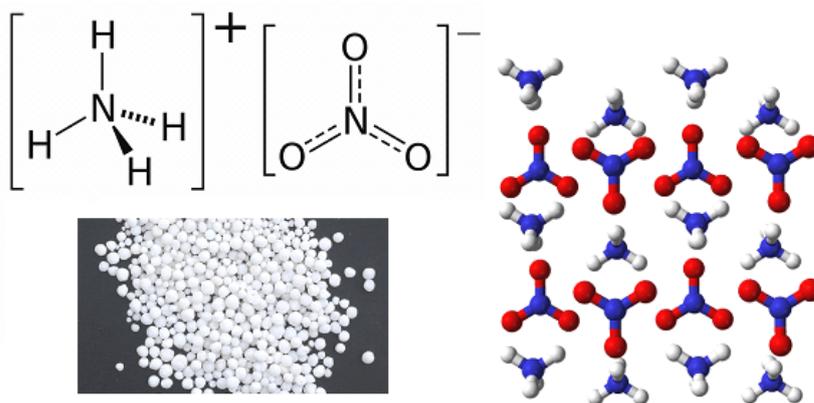


Рисунок 1 – Структурная формула аммиачной селитры [20]

Согласно ГОСТ 2 – 2013 «Селитра аммиачная. Технические условия» аммиачная селитра выпускается:

- марки А (для использования в промышленности);
- марки Б (для использования в сельском хозяйстве).

В некоторых случаях допускается применять в промышленных целях аммиачную селитру марки Б.

Согласно того же ГОСТ, аммиачная селитра имеет следующие физико-химические свойства марки А и Б, указанные в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-химические свойства аммиачной селитры [3]

Наименование показателя	Норма для марки			
	А	Б		
		Высший сорт	Первый сорт	Второй сорт
1 Внешний вид	Гранулы белого цвета или слегка окрашенные без механических примесей			
2 Суммарная массовая доля нитратного и аммонийного азота в пересчете на:				
- NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> в сухом веществе, %, не менее	98	Не нормируется		
- азот в сухом веществе, %, не менее	Не нормируется	34,4	34,4	34,0
3 Массовая доля воды, %, не более:				
Гигроскопической:				
- с сульфатной и сульфатно-фосфатной добавками	0,2	0,2	0,2	0,3
- с добавками нитратов кальция и магния	0,3	0,3	0,3	0,3
Общей:				
- с сульфатной и сульфатно-фосфатной добавками	0,5	0,5	0,5	0,5
- с добавками нитратов кальция и магния	0,6	0,6	0,6	0,6
4 рН водного раствора с массовой долей 10%, не менее:				
- с добавками нитратов кальция и магния	5,0	5,0	5,0	5,0
- с сульфатно- фосфатной добавкой	4,5	4,5	4,5	4,5
- с сульфатной добавкой	4,0	4,0	4,0	4,0
5 Массовая доля вещества, нерастворимых в 10%-ном растворе азотной кислоты, %, не более	0,2	Не нормируется		
6 Гранулометрический состав:				
- массовая доля гранул размером от 1 до 3 мм, %, не менее	93	Не нормируется		
- массовая доля гранул размером от 1 до 4 мм, %, не менее	Не нормируется	95	95	95
- массовая доля гранул размером от 2 до 4 мм, %, не более	Не нормируется	80	50	Не нормируется
- массовая доля гранул размером менее 1 мм, %, не	4	3	3	4
- массовая доля гранул размером от 2 до 4 мм, %, не более	0	0	0	0

На сегодняшний день полученную аммиачную селитру можно применить в разных отраслях промышленности, а также в сельском

хозяйстве. За счет того, что аммиачная селитра содержит 34% азота в своем составе, может возникнуть некоторые неудобства при транспортировке. Положительным качеством аммиачной селитры по сравнению с другими азотсодержащими удобрениями является ее стабильность, то есть выделяется меньшее количество азота в атмосферу. Поэтому ее чаще применяют в сельском хозяйстве в качестве основного удобрения и подкормки корневой системы растений.

Нитрат аммония также применим во взрывчатых веществах. Сама по себе аммиачная селитра является не взрывоопасной, но при взаимодействии с другими веществами и их свойствами может образоваться взрывчатая смесь.

На сегодняшний день самым крупным по объему выпускаемого взрывчатого вещества является ANFO. Данное взрывчатое вещество используется в добыче угля, карьерах, добыче металлов и гражданском строительстве в нетребовательных областях применения, где преимущества низкой стоимости ANFO, относительной безопасности и простоты использования имеют большее значение, чем преимущества обычных промышленных взрывчатых веществ, таких как водонепроницаемость, кислородный баланс, высокая скорость детонации и производительность при малых диаметрах.

«В Австралии, Китае, Афганистане, Ирландии и некоторых других странах свободная продажа нитрата аммония даже в виде удобрений запрещена или ограничена. После террористического акта в Оклахома-Сити ограничения на продажу и хранение нитрата аммония были введены в некоторых штатах США» [21, 22, 23].

Кроме производства взрывоопасных веществ аммиачная селитра применяется для выпуска более сложных минеральных удобрений и тукосмесей. Тукосмесь – это смесь, состоящая из некоторого количества минеральных удобрений. Получают ее с помощью механического перемешивания.

Сегодня Россию относят к одним из основных поставщиков аммиачной селитры, которая является популярным удобрением и пользуется большим спросом у российских фермеров. Ее производство составляет примерно 10 млн. т./год, из них 45% потребляется фермерами, 15% – промышленным сектором, 40% экспортируется. Среди ключевых российских производителей аммиачной селитры – «Уралхим» (3 млн. т./г.), «Еврохим» (2 млн. т./г.), «Акрон» (2 млн. т./г.). Доля производимой аммиачной селитры предприятием ПАО «КуйбышевАзот» в РФ составляет 5%.

«Согласно данным Минсельхоза РФ, по состоянию на 14 сентября 2020 г. практически во всех субъектах страны наблюдалась положительная динамика в обеспеченности аммиачной селитрой к заявленной потребности на 2020 г» [8].

«В перспективе в данных регионах к 2023 г. и 2025 г. планируется нарастить приобретение аммиачной селитры с учетом производства продукции растениеводства до следующих показателей, рисунок 2. В качестве факторов, способствующих увеличению объемов наращивания использования аммиачной селитры, можно отметить применение современных форм внесения аммиачной селитры, государственная поддержка (переориентация на интересы отечественных аграриев в условиях санкций, ограничение экспорта продукции), эффективное взаимодействие с производителями аммиачной селитры» [16].



Рисунок 2 – «План по наращиванию приобретения аммиачной селитры с учетом производства продукции растениеводства, тыс. тонн» [8]

На сегодняшний день мировой рынок по производству аммиачной селитры нестабилен из-за роста цены на энергоресурсы. За летний и осенний период 2021 г. цена за 1000 м<sup>3</sup> газа составляло 50 750 руб. Поэтому крупные европейские компании, такие как CF Industries, норвежская компания Yara, испанская Fertiberia, нидерландская OCI закрыли свое производство.

Ввиду того что цена на газы увеличились соответственно увеличились и цены на аммиак-сырье, которое используется в производстве аммиачной селитры. Так осенью 2021 года аммиак-сырье достиг отметки в цене 72 000 руб. за 1 т. по данным Argus. Сравнивая цены с января 2021 г. по 2023 можно сделать вывод, о том, что аммиак вырос в цене на 220%.

Рассмотрим на примере предприятие ПАО «КуйбышевАзот», которое выпускает аммиачную селитру, общие сведения химического предприятия, а также основная направленность стратегии развития в целом.

## 1.2 Общие сведения предприятия ПАО «КуйбышевАзот»

«Публичное акционерное общество «КуйбышевАзот» - химическое предприятие, расположенное в г. Тольятти Самарской области. «КуйбышевАзот» это ведущий производитель капролактама в России и странах СНГ (капролактама – это сырье для производства синтетических волокон, полиамидов, и конструкционных пластмасс, используемых в текстильной промышленности, автомобилестроении и многих других отраслях обрабатывающей промышленности)» [9].

«Кроме капролактама, общество также изготавливает аммиак, азотные удобрения и технологические газы и так же вступает в десятку мировых изготовителей по выработке капролактама, отечественной азотной промышленности, лидер в производстве полиамида-6 в России, СНГ и Восточной Европе.

Основная часть стратегии развития ПАО «КуйбышевАзот» – сокращение потребления ресурсов, сохранение и охрана окружающей среды также снижение техногенной нагрузки на нее. Вследствие системного подхода к природоохранной деятельности за период 2014-2021 гг. при повышении формирования товарной продукции в 1,8 раз выбросы в атмосферу уменьшились в 1,9 раз, а число химически загрязненных стоков – в 4,4 раза.

С целью достижения данной цели вводятся энерго - и ресурсосберегающие малоотходные технологии, реконструируются функционирующие производства и улучшается оборудование. Любой план компании на всех этапах, от разработки вплоть до осуществления, исполняется с учетом экологической составляющей» [9].

Рассмотрим общую характеристику цеха № 3 по производству аммиачной селитры, изучим ее историю, а также применяемые ресурсосберегающие технологии с начала ввода в эксплуатацию агрегатов. Выделим недостатки на стадии гранулирования аммиачной селитры.

### 1.3 Характеристика цеха № 3 предприятия ПАО «КуйбышевАзот»

Основная задача цеха №3 является ежегодное наращивание мощности производства с последующим соблюдением всех норм технологического процесса. В своем распоряжении предприятие имеет установку в цехе №3, состоящая из 2 агрегатов АС-72 по получению аммиачной селитры, выпускаемой марки Б высшего сорта. Также в цехе располагается установка по получению высокоэффективного жидкого удобрения КАС. Ввод в эксплуатацию производство аммиачной селитры началось в декабре 1965 г. После года работы была отмечена производительность, которая составляла 177 тыс. т/г. На основании производительности установки, было решено выполнить ряд технологических решений, направленные на улучшение технико-экономических показателей:

- в 1968 г. смонтирована установка скрубберов, которая направлена на переработку газов дистилляции цеха карбамида. В итоге получали 100% аммиачную селитру из переработанного газа в объеме 4000 м<sup>3</sup>/ч, где содержался аммиак более 80%.

- в 1969 г. прошла замена горизонтальных выпарных аппаратов второй ступени на аппараты вертикального типа, в которых установлены доупорочное оборудование. Вследствие чего, улучшилось качество аммиачной селитры.

- в 1970 г. произошла замена однослойного кипящего слоя на двойной кипящий слой, находящиеся на грануляционных башнях. Удалось добиться снижение температурных характеристик грануляционной аммиачной селитры.

- 1971-72 гг. выполнен ряд работ, направленные на уменьшение воздействия негативных факторов на окружающую среду. К ним относятся: а) установка новых ловушек после аппарата ИТН; б) замена выпарных аппаратов первой ступени дистилляции; в) замена старого сепаратора на сепаратор новой конфигурации; г) установка сепаратора в отделении

грануляции с промывкой сокового пара; д) дополнительная установка 25 кубовой емкости и дополнительных насосов для конденсации сокового пара; е) установка поверхностного конденсатора для конденсации сокового пара после продувки выпарных аппаратов первой ступени, расширителей раствора, аппаратов ИТН и сборников; ж) перевод выброса с установкой приготовления азотнокислого разложения магнезита на общую выхлопную трубу высотой 70 м.

- в 1971 г. было решено внедрить антислеживающую добавку. В качестве добавки выступал азотнокислый раствор магнезита;

- в 1984 г. была внедрена установка для глубокой очистки воздуха. Данная установка имеет орошаемые промыватели, которые очищают воздух от пыли, аммиачной селитры и аммиака. В этом же году стали производить жидкое высокоэффективное удобрение (КАС), согласно ТУ 113-03-27-52-83 [19]. Производственная мощность КАС составляло 85 тыс. т/г.

После проведения ряда работ в 1986 г. достигнутая мощность цеха №3 увеличилось до 450 тыс. т/г. На основании производительности установки, было решено выполнить ряд следующих технологических решений, направленные на улучшение технико-экономических показателей агрегата:

- в 1988 г. выполнена реконструкция аппаратов ИТН и скрубберов;

- в 1993 г. освоена установка «Биг-Бег» с целью отгрузки полученной аммиачной селитры в мягкие кубовые мешки.

После 1993 г. и до сегодняшнего дня никаких оптимизаций по процессу получения аммиачной селитры не было.

Вид продукции технологического участка цеха №3 – аммиачная селитра; плановая выработка – с октября по май составляет 1700 т./сут., а с июня по сентябрь 1500 т./сут.

«В настоящее время наибольшее количество аммиачной селитры в России производится на агрегатах АС-72 и АС-72М советской постройки. Технологическая схема получения аммиачной селитры в цехе № 3 представлена на рисунке 3.

Длительный опыт эксплуатации данных агрегатов на предприятиях отрасли подтвердил наличие резервов оборудования, позволяющих при работе на форсированных нагрузках без ущерба для качества продукции и безопасности процесса достичь повышения проектной суточной выработки с соответствующим повышением годовой производительности. Вместе с тем в процессе эксплуатации агрегатов АС–72 и АС–72М выявлен ряд недостатков, снижающих эффективность их работы.

Заложенные по изначальному проекту запасы в технологическом оборудовании, а также внедрение ряда технических решений позволяют значительно увеличить мощность существующих агрегатов путем точечного расширения «узких» стадий существующих производств. Такой подход является экономически оправданным по сравнению со строительством новых агрегатов» [1].

Главным недостатком при эксплуатации агрегата АС–72 АС–72М было выявлено на стадии гранулирования аммиачной селитры.

Условные обозначения:

- 1-реактор-нейтрализатор;
- 2-подогреватель азотной кислоты;
- 3-подогреватель аммиака;
- 4-донейтрализатор;
- 5-выпарной аппарат;
- 6-подогреватель воздуха;
- 7-нагнетатель воздуха;
- 8-насос;
- 9-дренажная емкость плава;
- 10-гидрозатвор-донейтрализатор;
- 11-фильтр плава;
- 12-емкость плава;
- 13-насос плава;
- 14-насос раствора;
- 15-емкость промывной жидкости скрубберов;
- 16-напорный бак;
- 17-гранулятор;
- 18-скруббер;
- 19, 20-промывной скруббер;
- 21-буферная емкость;
- 22-нагнетатель воздуха;
- 23-подогреватель воздуха;
- 24-аппарат охлаждения гранул;
- 25-конвейер;
- 26-элеватор;
- 27-аппарат для опрыскивания гранул.

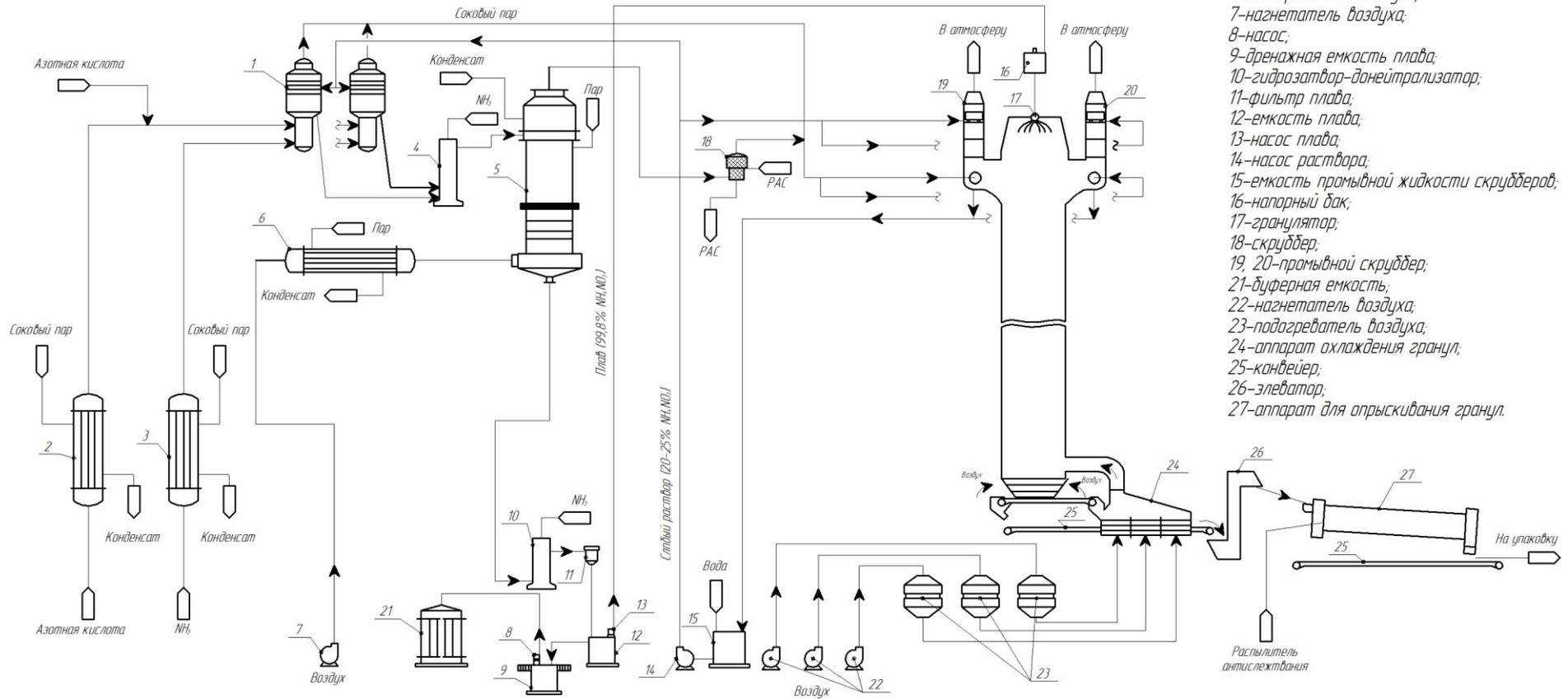


Рисунок 3 – Технологическая схема цеха № 3 предприятия ПАО «Куйбышевазот» по получению аммиачной селитры

## 1.4 Недостатки стадии гранулирования аммиачной селитры

Самым важным критерием при производстве аммиачной селитры является температурный режим воздуха, подаваемый в грануляционную башню. Из-за этого производительность аммиачной селитры с октября по май составляет 1700 т./сут., а с июня по сентябрь 1500 т./сут. Было также замечено, что производительность аммиачной селитры в цехе №3 с каждым годом падает из-за неправильного температурного режима работы стадии гранулирования, а также изменение климатических условий в нашем регионе.

Главным недостатком на стадии гранулирования аммиачной селитры является ненадлежащее охлаждение продукта атмосферным воздухом при формировании гранул. Исходя из этого, в кипящем слое конуса грануляционной башни образуется налипание необразованных гранул к конусу аппарата и между собой, как показано на рисунке 4.



Рисунок 4 – Налипание к конусу грануляционной башни не образовавшихся гранул в кипящем слое

В цехе № 3 в дневное время суток прекращают подачу воздуха в грануляционные башни из-за негативного эффекта, связанного с превышением температуры нормативных показателей.

Главной целью оптимизации будет являться повышение производительности с июня по сентябрь до 1700 т./сут. за счет оборудования охлаждения атмосферного воздуха.

Для дальнейшей работы проведем анализ патентных изобретений, которые применяются в производстве на стадии гранулирования аммиачной селитры.

### 1.5 Патентный поиск

Для написания выпускной квалификационной работы был выполнен поиск по патентным изобретениям, относящиеся к стадии гранулирования аммиачной селитры, а именно к процессу охлаждения воздуха перед его подачей в грануляционные башни. Перечисленные патенты в таблице 2 найдены с помощью базы данных «Федерального института промышленной собственности» (ФИПС).

Таблица 2 – Результаты патентного поиска

Номер патентного документа, международная патентная классификация	Наименование патентного документа	Владелец патентного документа	Ф.И.О. изобретателя
Патент РФ RU 138119 U1 МПК F28D 1/04 (2006.1)	Аппарат обработки воздуха	Открытое акционерное общество «КуйбышевАзот»	Огарков А. А. Аникушин С. А. Лебедев П. В. Федоров В. И.
Патент РФ RU 138138 U1 МПК B01J 21/00 (2006.1) C05C 9/00 (2006.1)	Холодильная система непосредственного кипения	Открытое акционерное общество «КуйбышевАзот»	Огарков А. А. Аникушин С. А. Лебедев П. В. Федоров В. И.
Патент РФ RU 14273 U1 МПК F25D 9/00 (2006.1)	Воздухоохладитель холодильной установки с автоматической системой оттайки	Закрытое акционерное общество «Промхолод»	Овчаренко В. С. Афонский В. П. Баранов А. И.

Продолжение таблицы 2

Патент РФ RU 2 401 247 C2 МПК C01C 1/18 (2006.1)	Способ производства аммиачной селитры и фильтрующий элемент для тонкой очистки паровоздушной смеси перед сбросом в атмосферу от аммиачной селитры и аммиака	Копиевский И. В. Федорова Е. М.	Копиевский И. В. Ферд М. Л. Дрибинская А. Н.
---	--	------------------------------------	--

Патент 14273 U1 [14] представляет собой теплообменник, состоящий из пучка оребренных труб. Также данная модель воздухоохладителя включает в себя функцию автоматического оттаивания образованной снеговой шубы на оребренных трубах. Из описанных недостатков в параграфе 1.4 данное изобретение является не совсем подходящим для стадии гранулирования аммиачной селитры.

Патент 2 401 247 C2 [15] представляет собой схему производства аммиачной селитры. После проведения процесса гранулирования атмосферный воздух очищается с помощью фильтрующего элемента и охлаждается до 30 °С. Такое изобретение также не соответствует недостаткам описанные в параграфе 1.4.

Для рассмотрения будут интересны два патента 138119 U1 [12] и 138138 U1 [13], которые стоит объединить в один процесс. Патент 138119 U1 представляет собой аппарат обработки воздуха, который играет роль теплообменника, состоящий из секций оребренных медных труб, соединенных между собой. Такой аппарат способен охладить воздух до 15°С. Такая температура способствует минимальному количеству слипшихся между собой гранул, а также самого плава на конусе грануляционной башни. Патент 138138 U1 представляет собой холодильную систему, состоящая из защитного циркуляционного ресивера. Данный аппарат выполняет функцию разделения жидкого аммиака от его паров.

Проведенный патентный поиск выдал существующие на сегодняшний день способы оптимизации в области стадии гранулирования аммиачной селитры. На этом этапе тема оптимизации является актуальной, но применяемые методы не всегда дают желаемых результатов.

Вывод по теоретической части: в теоретической части была рассмотрена характеристика цеха № 3 по производству аммиачной селитры, а также общие сведения предприятия ПАО «КуйбышевАзот» в целом. При изучении технологической схемы и на основании исследований, были выявлены недостатки на стадии гранулирования, связанные с температурным режимом воздуха, который подается в грануляционную башню из-за изменений климатических условий в нашем регионе.

Для устранения данных недостатков на стадии гранулирования следует рассмотреть патент 138119 U1, который способен охладить температуру атмосферного воздуха до 15°C, что позволит повысить эффективность работы всей установки в летнее время до 1700 т./сут. Для циркуляции хладагента к аппаратам обработки воздуха будет осуществляться с помощью холодильной системы, согласно патенту 138138 U1.

## **2 Технологическая часть**

### **2.1 Описание промышленной площадки цеха № 3**

Вид продукции технологического участка цеха №3 – аммиачная селитра; плановая выработка в зимний период составляет 1700 т./сут., а в летний 1500 т./сут.

Особенностью существующего производства является наличие на промышленной площадке транзитных технологических коммуникаций, а именно жидкостной ( $p=16$  атм.) и парогазовой ( $p=3$  атм.) аммиачных магистралей, к которым имеется возможно подключить защитный циркуляционный ресивер по патенту № 138138U2. Данное решение позволит отказаться от применения компрессорного оборудования для совершения работы холодильного цикла и получить эффект охлаждения за счёт использования разницы энтальпий существующих технологических аммиачных потоков.

Систему охлаждения в технологическом плане можно рассматривать, как участок существующей трубопроводной сети использующихся реагентов, на котором специальным образом организованы условия для дросселирования потока высокого давления и испарения жидкой фазы аммиака. С учетом специфики технологического процесса и уровня технической оснащённости существующего производства, рассматриваемый участок не является сложным или уникальным объектом, а его схемное решение типично для решения подобных задач (принятая технологическая схема охлаждающего контура модулей обработки воздуха представляет собой пример классической промышленной насосно-циркуляционной аммиачной системы охлаждения).

## 2.2 Описание оптимизационной установки системы охлаждения атмосферного воздуха

Система охлаждения является вспомогательным участком основного технологического процесса; вид продукции – искусственный холод на температурном уровне  $+8^{\circ}\text{C}$  (3168 кВт); теплообменное оборудование для обработки воздуха обеспечивает охлаждение воздушных потоков (подаваемых на момент проектирования к потребителям без термообработки) до температуры не более  $+24^{\circ}\text{C}$  на входе в технологическое оборудование. Объём подаваемого воздуха, после реализации проектных решений, остаётся без изменений –  $4 \times 55000 \text{ м}^3/\text{час}$ , согласно патенту № 138119U1.

Включены дополнительные узлы обработки охлаждающей среды, состоящие из секций теплообмена для охлаждения воздуха, сепаратора влаги, участка стабилизации потока, поворотного воздуховода и короба (рисунок 6). Для обеспечения постоянного охлаждения воздуха в летнее время, данный участок должен быть оборудован циркуляционным контуром.

По отводу ( $\varnothing 108 \times 4,0$ ) от транзитной магистрали жидкий аммиак ( $p=16$  атм.,  $G \approx 10520 \text{ кг/час}$ ) поступает на узел регулирования давления (соленоидный вентиль EVRA 40 и регулирующий вентиль REG 25 D) циркуляционного ресивера (поз. V010). При прохождении жидкого аммиака через регулирующий узел со значительным гидравлическим сопротивлением выделяется тепловая энергия, что приводит к частичному вскипанию потока хладагента, и на вход в циркуляционный ресивер поступает парожидкостная смесь с небольшим массовым содержанием паров аммиака ( $p=4,8$  атм.,  $G \approx 10520 \text{ кг/час}$ ). Поступающий в циркуляционный ресивер поток разделяется – жидкость за счет гравитационных сил осаждается в нижней части аппарата, пары – остаются в верхней части ресивера и, в автоматическом режиме, сбрасываются в паровую магистраль. Из стояка циркуляционного ресивера жидкость с температурой кипения ( $t_0=+8^{\circ}\text{C}$ ) двумя герметичными насосами (поз. P100, P110;  $V=2 \times 37 \text{ м}^3/\text{час}$ ,  $h=30 \text{ м ст.ж.}$ ) подается к секциям охлаждения теплообменных

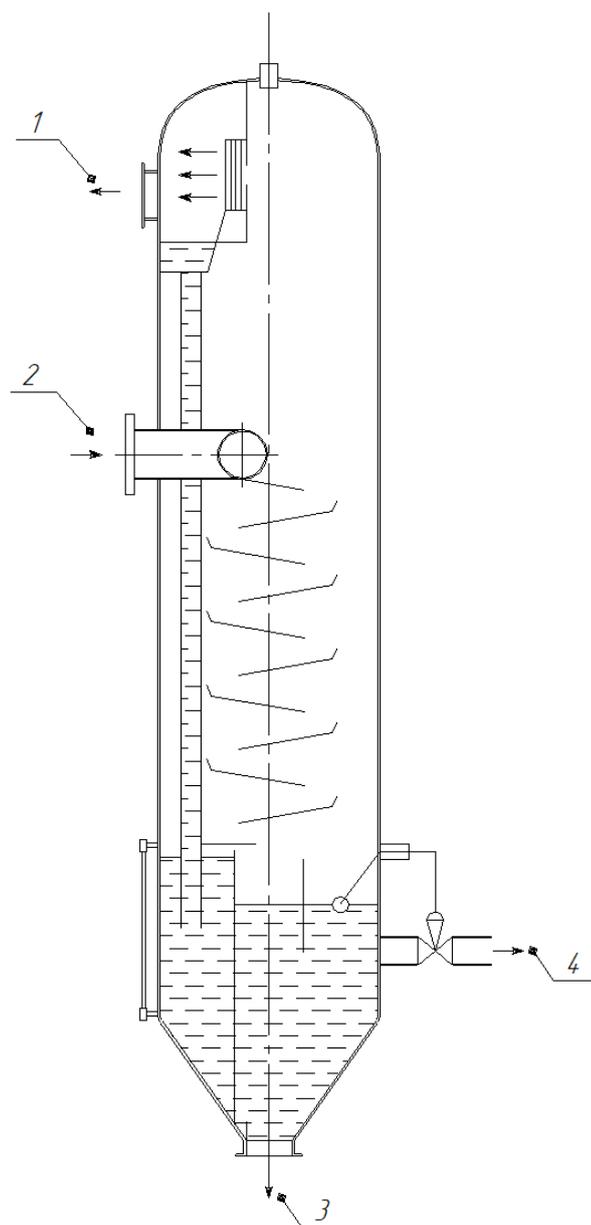
аппаратов поз. E200÷E230 (по трубопроводам  $\varnothing 108 \times 4,0$  на каждую из двух групп аппаратов).

В теплообменных секциях за счет интенсивных теплопритоков от охлаждаемой воздушной среды жидкий аммиак частично выкипает ( $p=4,8$  атм.,  $t_0=+8^0$  C), парожидкостная смесь с повышающейся по ходу хладагента степенью сухости, а, следовательно, с понижающейся средней плотностью потока поднимается / проталкивается в верхнюю часть аппарата (линии подачи на каждый аппарат –  $\varnothing 89 \times 3,5$ , отвод парожидкостной смеси –  $\varnothing 133 \times 4,0$ ,  $G \approx 11500$  кг/час, кратность циркуляции – не менее 4). Из теплообменных секций парожидкостной поток возвращается по двум магистралям ( $\varnothing 159 \times 4,5$ ) и попадет в трубопровод ( $\varnothing 219 \times 6,0$ ).

В циркуляционном ресивере, вследствие резкого падения скорости и изменения направления потока парожидкостная смесь разделяется, капли жидкости за счет гравитационных сил осаждаются в сосуде и вновь попадают на вход насосных агрегатов.

Для снижения рабочей нагрузки на защитный циркуляционный ресивер будет установлен вертикальный гравитационный сепаратор, который способен осадить образовавшиеся пар после прохождения аппарата обработки воздуха из аммиачной жидкости. При процессе осаждения в сепараторе вместе с парами уходит небольшое количество капель жидкого аммиака, который называется капельный унос жидкости. «Капельный унос – это количество жидкости, которая остается в газе после сепаратора, т.е. жидкость, которая в силу различных причин не осела в аппарате» [5]. Для предотвращения капельного уноса жидкости и последующего попадания в магистральный трубопровод следует установить в верхнюю часть сепаратора жалюзийную решетку. Выбор данного сепаратора обосновывается тем, что он способен пропускать через себя небольшой объем парожидкостной смеси до  $1000 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Положительными качествами вертикального сепаратора является его дальнейшее обслуживание (чистка отложенных веществ на дне аппарата), а также не занимает много пространства. Эскиз вертикального гравитационного сепаратора показан на

рисунке 5.



1 – выход паров аммиака; 2 – вход парожидкостной смеси; 3 – выход образованного шлама;  
4 – выход жидкого аммиака

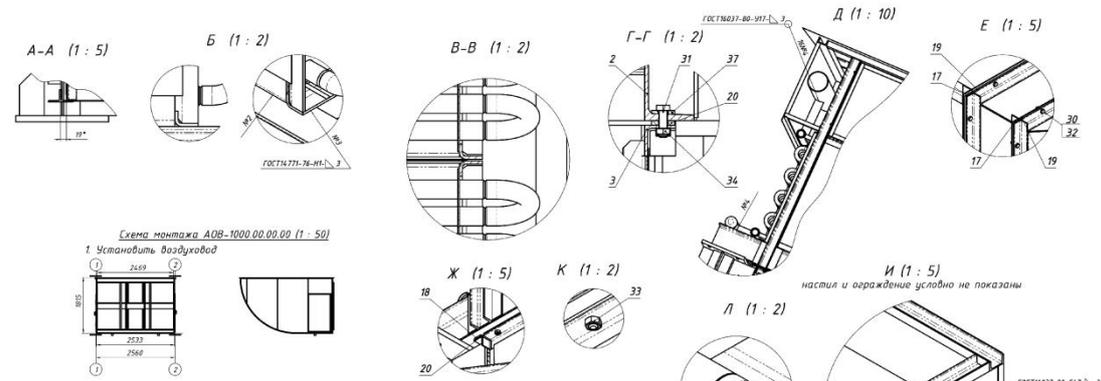
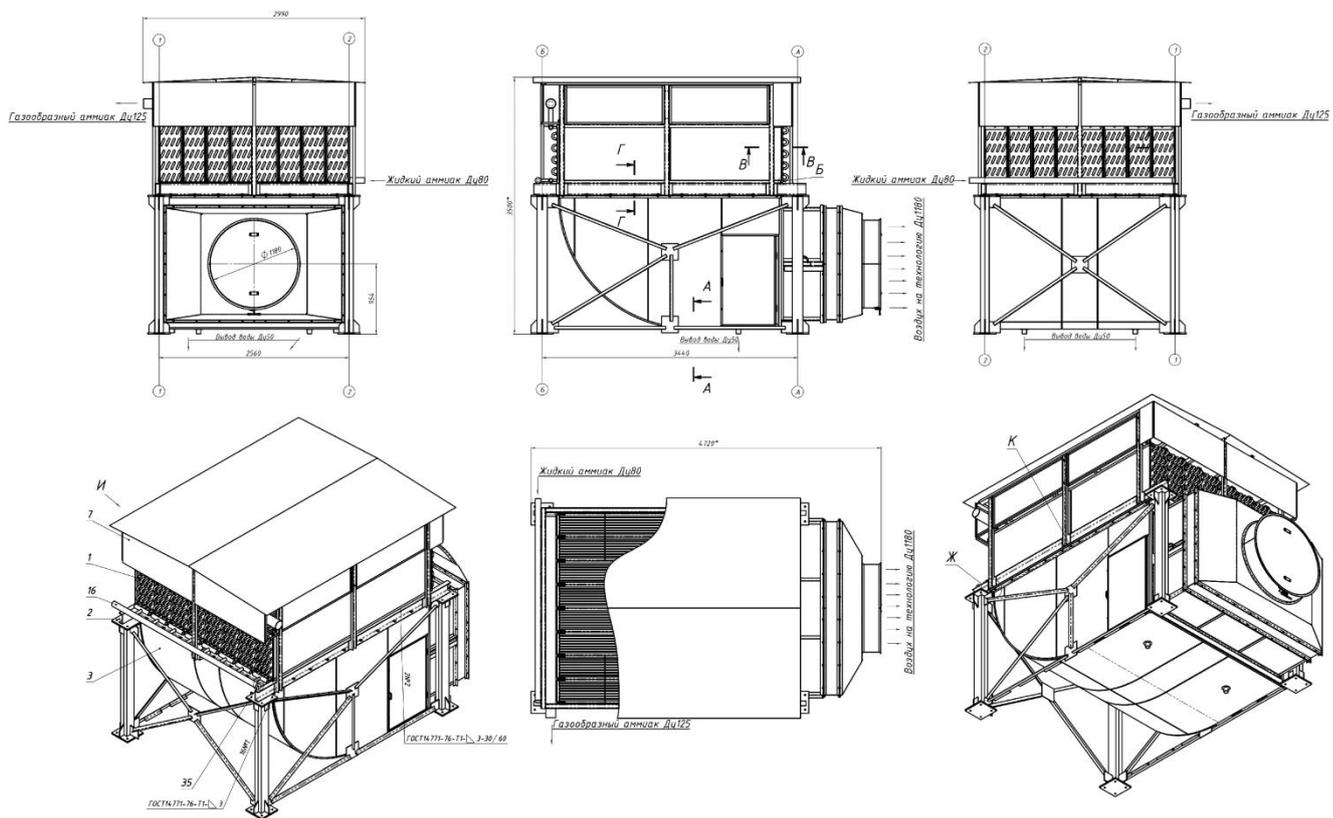
Рисунок 5 – Эскиз вертикального гравитационного сепаратора

Принцип работы данного сепаратора очень прост. Парожидкостный аммиак с температурой  $+21^{\circ}\text{C}$ , после прохождения теплообменника попадет в вертикальный гравитационный сепаратор, имеющий рабочее давление  $P = 1,6$  МПа. За счет давления в аппарате и скорости подачи парожидкостного аммиака

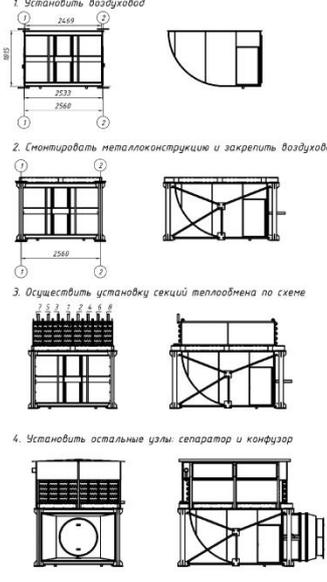
происходит процесс разделения пара аммиака от его жидкости. Это происходит из-за легкого веса паров, которые остаются и накапливаются под крышкой сепаратора. Жидкий аммиак, имеющий больший вес, чем его пары в составе, осаждаются на коническом дне сепаратора. Накопленный газ в сепараторе проходит в секцию каплеудаления через жалюзийную решетку и попадает на линию отвода паров из аппарата. Также в сепараторе предусмотрен предохранительный клапан для сбрасывания избыточных паров аммиака. Полученный жидкий аммиак возвращается обратно в ресивер в циркуляционный контур.

В ресивере происходит остаточное разделение паров аммиака от его жидкости [10]. Пары аммиака остаются в верхней части ресивера, тем самым приводя к повышению давления в системе. Сброс (отвод) паров для поддержания равновесного рабочего режима давления в ресивере ( $p=4,8$  атм.) осуществляется по магистрали ( $\varnothing 273 \times 8,0$ ,  $G \approx 9500$  кг/час) с помощью двух включённых параллельно регуляторов давления (сервоуправляемый вентиль ICS 150 с клапаном поддержания постоянного давления CVP LP и соленоидным вентилем EVM NC) в технологический паровой трубопровод ( $p=3,0$  атм.).

Технологический процесс, связанный с работой системы охлаждения и обработкой воздуха, происходит одновременно с эксплуатацией аппаратов кипящего слоя, осуществляется непрерывно и круглосуточно, управление работой оборудования осуществляется в автоматическом режиме, согласно рисунку 7.



**Схема монтажа АОВ-1000.00.00.00 (1 : 50)**



**Примечание**

1. \*Размеры для справок.
2. Испытать на герметичность и прочность сжатым воздухом избыточным давлением 2,0 МПа с выдержкой в этих условиях на протяжении 5..6 минут без снижения давления.
3. Испытать на герметичность и прочность сжатым воздухом избыточным давлением 1,6 МПа с выдержкой в этих условиях на протяжении 12 часов без снижения давления.
4. Места соприкосновения деталей шпательовать изнутри. Шпателька ПФ-002 ГОСТ 10277-90.
5. Покрывать грунтовкой ФЛ-03К ГОСТ 9109-81.
6. Покрывать эмалью МЛ-152 23 1262 0405 00 ГОСТ 18099-78 (оранжевая).
7. Общие допуски по ГОСТ 30893.1 ± IT14/2.
8. Общие допуски формы и расположения по ГОСТ 30893.2-К.
9. Маркировать обозначение на бирке.
10. Остальные технические требования по АСТ 4. Г.0.070.015.

**Рисунок 6 – Сборочный чертеж аппарата обработки воздуха (АОВ)**

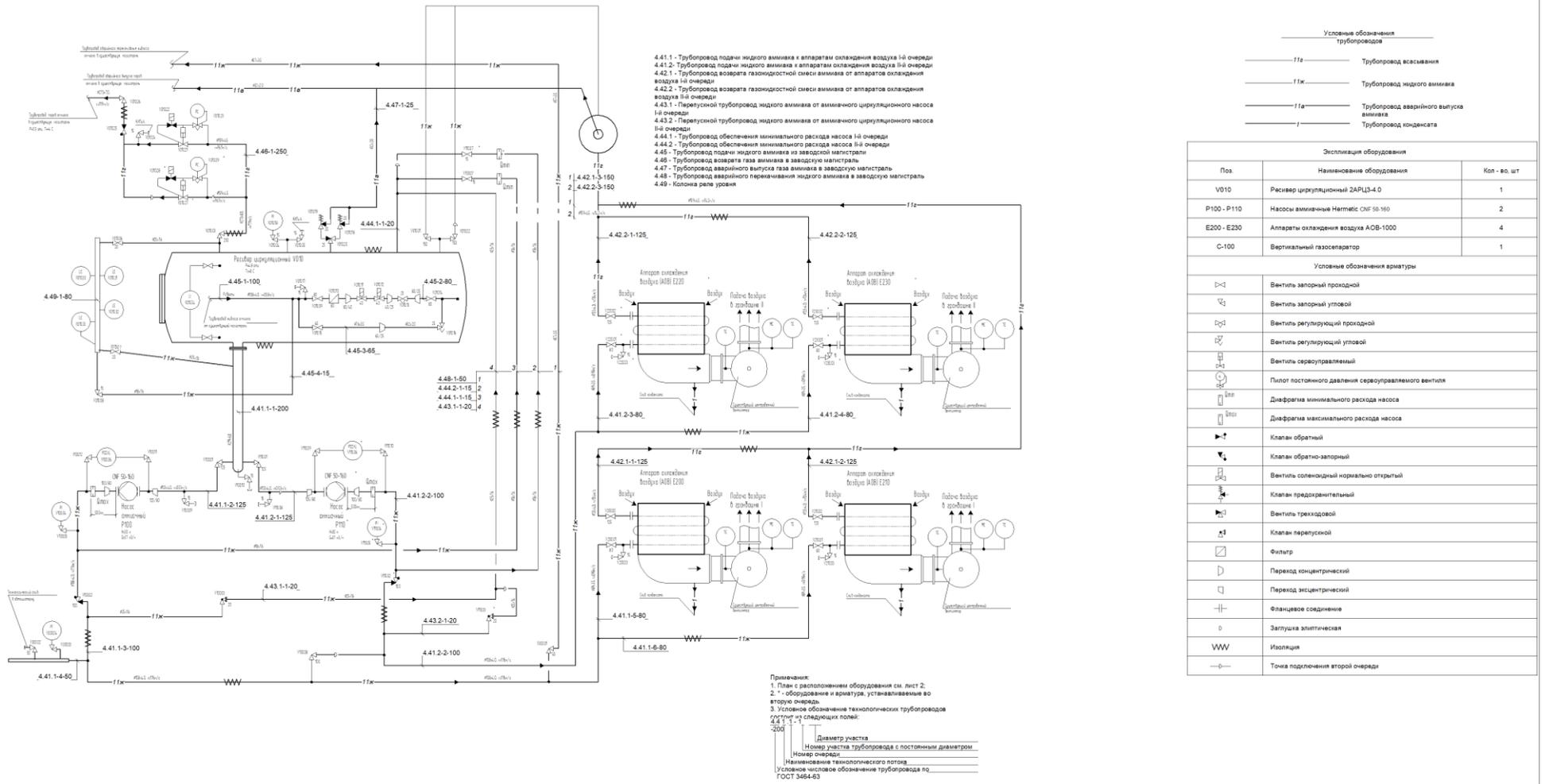


Рисунок 7 – Проектируемая система охлаждения атмосферного воздуха на стадии гранулирования аммиачной селитры

### **2.3 Область применения и назначение изделия аппарата охлаждения воздуха**

Аппарат обработки воздуха не является сосудом, работающим под давлением, и на него не распространяются требования «Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» ПБ 03-576-03, утвержденных Госгортехнадзором России.

Аппарат предназначен для использования в системе охлаждения наружного воздуха перед подачей его в аппараты кипящего слоя башен гранулирования минеральных удобрений.

Аппарат для охлаждения атмосферного воздуха и конденсации из него влаги (без образования инея) и в иных условиях использован быть не может. Выделение влаги происходит на наружной поверхности ребрения секций теплообмена. Сконденсированная из воздуха вода выводится из потока воздуха.

Аппарат также может быть использован для охлаждения атмосферного воздуха в системах технологического кондиционирования воздуха перед подачей его в технологическое оборудование.

Параметры использования аппарата: давление атмосферного воздуха  $0,1 \pm 0,01$  МПа; температура атмосферного воздуха 15...45°C; расход воздуха - не более 17,0 м/с; потери напора на стороне всасывания — не более 100 Па.

Отвод тепла от атмосферного воздуха производится, кипящим аммиаком движущимся внутри горизонтальных труб. Подача аммиака в теплообменные трубы аппарата обеспечивается самоциркуляцией или центробежным насосом от узла циркуляционный ресивер – центробежный насос. Более приемлемым является насосный вариант подачи аммиака. Давление кипения аммиака в диапазоне от 0,45 до 0,62 МПа. Максимальный расход аммиака на аппарат 2500 кг/час.

Аппарат размещается на открытой площадке. Режимы работы аппарата определяются температурой наружного воздуха. При температурах воздуха

ниже +15°C аппарат не эксплуатируется, подача жидкого аммиака в теплообменные секции прекращается, циркуляция аммиака в трубах отсутствует. Давление аммиака в трубах принимает значение соответствующее температуре атмосферного воздуха, именно от 0,45 до 0,12 МПа (что соответствует температуре воздуха от +15 до - 30 °С). На рисунке 6 показан чертеж изделия аппарата охлаждения воздуха (АОВ).

## 2.4 Техническая характеристика аппарата обработки воздуха (АОВ)

В таблице 3 указаны технические характеристики аппарата обработки воздуха (АОВ).

Таблица 3 – «Технические характеристики аппарата обработки воздуха (АОВ)» [11]

Наименование показателя	Показатели
1 Площадь поверхности теплообмена, м <sup>2</sup>	1000,0 ±10,0
2 Температура воздуха после аппарата обработки воздуха, °С	15,0 ±2,0
3 Тепловой поток при температуре наружного воздуха t <sub>н.в.</sub> = 35 °С, кВт	800,0 ±8,0
4 Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	15,3±0,5
5 Аэродинамическое сопротивление аппарата, Па	95,0±5,0
6 Температура кипения аммиака, °С	8,0±2,0
7 Рабочая среда:	
- трубное пространство	аммиак
- межтрубное пространство	атмосферный воздух
8 Подача жидкого аммиака	снизу (нижний коллектор)
9 Выход парогазовой смеси аммиака	сверху (верхний коллектор)
10 Вход потока воздуха на теплообменную поверхность	сверху
11 Выход потока воздуха (подача на технологию)	сбоку (в плоскости оси Б)
12 Число секций теплообменных, шт.	8
13 Параметры секции теплообменной:	
- общее число оребренных труб, шт	40
- число оребренных труб по фронту потока воздуха, шт.	4
- по ходу потока воздуха	10
- длина оребренной части трубы, м	2,985
- шаг оребренных труб по фронту воздушного потока, мм	70,0±0,5
- шаг труб по ходу воздушного протока, мм	80,0±0,5

Продолжение таблицы 3

14 Параметры оребрения:	
- диаметр трубы (основа), мм	25,0
- толщина трубы, мм	2,5
- диаметр ребра, мм	65,0±1,0
- диаметр трубы с алюминиевой наплавкой, мм	28,0±0,3
- шаг ребра, мм	5,0±0,3
- средняя толщина ребра, мм	1,5±0,1
- площадь одного метра погонного оребренной трубы, м <sup>2</sup>	1,17±0,01
- коэффициент оребрения	19,1
15 Габаритные размеры аппарата, мм , не более:	
- длина, мм	4740,0
- ширина, мм	3030,0
- высота, мм	3510,0
16 Масса аппарата, кг	6070

## 2.5 Описание конструкции аппарата обработки воздуха (АОВ)

Аппарат представляет собой теплообменник, трубчато-ребристые элементы, которого обдуваются воздухом. Составные части аппарата:

- теплообменные секции;
- опорные металлоконструкции;
- воздуховод;
- сепаратор;
- конфузор;
- ограждение.

Способ подачи воздуха в аппарат вытяжной, поперечноточный. Направление потока воздуха в теплообменных секциях обеспечивается боковыми щитами.

Основным узлом аппарата обработки воздуха является теплообменные секции. Размещение секций теплообмена в аппарате горизонтальное. Жесткость конструкции секции обеспечивается оребрением, направляющими щитами, связующими планками и косынками. Секция оборудована патрубком и коллектором для подачи в трубное пространство жидкого аммиака (диаметром 38x2,5 мм) и патрубком и коллектором для выхода парожидкостной смеси (диаметром 57x3,5 мм). Ребристая поверхность

секции теплообмена, вследствие плотного контакта трубы и ребра, обеспечивает эффективную передачу тепла охлаждаемому воздуху, уменьшая в целом габариты аппарата и его металлоемкость.

Опорным узлом является металлоконструкция, которая воспринимает нагрузку от массы всех узлов аппарата. Выполнена из четырех вертикальных стоек, на которые устанавливается рама, формирующая размер свободного живого сечения аппарата по воздуху. Жесткость конструкции узла обеспечивается стяжками, укрепляющими угловые точки металлоконструкции.

Воздуховод формирует поток воздуха, обеспечивая его поворот на 90°. Кроме направления потока технологического воздуха воздуховод предназначен для сбора выделенной из воздуха влаги в секциях и сепараторе и выведении влаги из аппарата.

Сепаратор аппарата представляет собой блок, устанавливаемый в проеме выходного сечения воздуховода. Герметичность соединения двух узлов обеспечивается набивкой войлочного материала. Сепаратор включает в себя каркас, пять секций и щиты для направления потока воздуха. Секции сепаратора набраны из профилированных оцинкованных стальных листов (направляющих) толщиной 0,5 мм, устанавливаемых с шагом 15 мм. Дистанционирование направляющих обеспечивается установкой между ними фторопластовых шайб. Собранный каркас оборудуется планками и сжимается стяжками. Секции вставляются в воздуховод образованный каркасом и щитами, занимая весь объем сепаратора.

Конфузор формирует поток воздуха перед входом его в воздуховод и патрубков всасывания вентилятора и имеет вид усеченной пирамиды.

Ограждение представляет собой каркас, собранный из швеллеров и уголков, на котором размещается навес из кровельного профиля или оцинкованной стали. Ограждение предназначено для устранения влияния солнечной радиации на процесс теплообмена, исключения попадания атмосферных осадков в секции теплообмена аппарата. На боковых стенах

ограждения закреплена сетка для исключения попадания в аппарат посторонних предметов. Ограждение включает в себя две съемные рамы для обслуживания секций теплообменных (для промывки секций водой).

Вывод по технологической части: положительными качествами для использования холодильной системы и аппарата обработки воздуха является наличие на промышленной площадке существующих технологических коммуникаций а именно жидкостной ( $p=16$  атм.) и парогазовой ( $p=3$  атм.) аммиачных магистралей, к которым имеется возможность подключения.

Данное решение позволит отказаться от применения компрессорного оборудования для совершения работы холодильного цикла и получить эффект охлаждения за счёт использования разницы энтальпий существующих технологических аммиачных потоков.

### 3 Расчетная часть

#### 3.1 Расчет аппарата обработки воздуха

В таблице 4 приведены исходные данные для расчета аппарата обработки воздуха

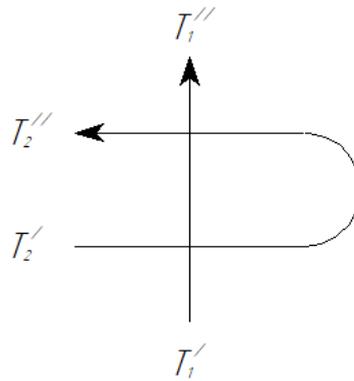
Таблица 4 – Исходные данные для расчета АОВ

Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	$V_1 = 55000$
Температура воздуха на входе в аппарат, °С	$T'_1 = 35$
Температура воздуха на выходе из аппарата, °С	$T''_1 = 15$
Температура жидкого аммиака на входе в аппарат, °С	$T'_2 = 8$
Температура жидкого аммиака на выходе из аппарата, °С	$T''_2 = 19$
Число трубок в ряду в направлении к потоку воздуха 8 секций, шт.	$Z_T = 320$
Число ходов жидкого аммиака	$x = 5$
Число ходов воздуха	$y = 1$
Расстояние между трубными досками (длина трубок), м	$l = 2,985$
Диаметр трубок:	
- диаметр ребра, мм	$d_H = 65$
- внутренний	$d_{вн} = 20$
Относительный шаг трубок	2,5
Расположение трубок в пучке	коридорное
Продольный $S_1$ шаг в пучке труб в направлении поперечном потоку воздуха, мм	70
Поперечный $S_2$ шаг в пучке труб по ходу потока воздуха, мм	80

##### 3.1.1 Тепловой расчет аппарата обработки воздуха

Тепловой расчет аппарата обработки воздуха будет выполнен по учебно-методическому руководству [6].

1. На основании исходных данных вычертим схему движения теплоносителей в аппарате обработки воздуха (рисунок 7).



$T_1' = 35^\circ\text{C}$  – температурный поток входящего воздуха;  $T_1'' = 15^\circ\text{C}$  – температурный поток выходящего воздуха из аппарата АОВ;  $T_2' = 8^\circ\text{C}$  – температурный поток входящего жидкого аммиака в аппарат АОВ;  $T_2'' = 19^\circ\text{C}$  – температурный поток выходящего жидкого аммиака из аппарата АОВ

Рисунок 7 - Схема движения теплоносителей в аппарате обработки воздуха

2. По заданным температурам вычисляют определяющие температуры воздуха, жидкого аммиака и стенки по формулам:

$$T_1 = 0,5 * (T_1' + T_1'') \quad (1)$$

$$T_1 = 0,5 * (35^\circ\text{C} + 15^\circ\text{C}) = 25^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 0,5 * (T_2' + T_2'') \quad (2)$$

$$T_2 = 0,5 * (8^\circ\text{C} + 19^\circ\text{C}) = 13,5^\circ\text{C}$$

$$T_c = T_2 + \xi * (T_1 - T_2) \quad (3)$$

$$T_c = 13,5^\circ\text{C} + 0,1 * (25^\circ\text{C} - 13,5^\circ\text{C}) = 14,65^\circ\text{C}$$

где:  $\xi$  – коэффициент, принимаемый 0,1 [6].

3. В таблице физических свойств сухого воздуха (табл. 3 Приложения) [6] по определяющей температуре воздуха  $T_1 = 25^\circ\text{C}$  с помощью интерполяции находим нижеследующие значения:

- плотность  $\rho_1 = 1,185 \text{ кг/м}^3$  [6];
- массовая теплоемкость  $C_{p1} = 1,0045 \text{ кДж/(кг * К)}$  [6];
- коэффициент теплопроводности  $\lambda_1 = 0,02635 \text{ Вт/(м * К)}$  [6];
- кинематический коэффициент вязкости  $\nu_1 = 15,53 * 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  [6].

4. По таблицам физических свойств жидкого аммиака [2, 18] по определяющей температуре воздуха  $T_2 = 13,5^\circ\text{C}$  с помощью интерполяции находим нижеследующие значения:

- плотность:  $\rho_2 = 619,56 \text{ кг/м}^3$  [2, 18];
- массовая теплоемкость:  $C_{p2} = 4,6842 \text{ кДж/(кг * К)}$  [2, 18];
- коэффициент теплопроводности:  $\lambda_2 = 0,4837 \text{ Вт/(м * К)}$  [2, 18];
- кинематический коэффициент вязкости:  $\nu_2 = 0,24905 * 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  [2, 18];
- число Прандтля:  $Pr_{ж2} = 1,489$ ;
- коэффициент объемного расширения:  $\beta_2 = 2,33225 * 10^3 \text{ 1/К}$ .

А по температуре стенки  $T_c = 14,65^\circ\text{C}$  подбирается значение числа Прандтля для жидкого аммиака  $Pr_{c2} = 1,4821$ .

5. Определим водяные эквиваленты теплоносителей и тепловой поток:

- водяной эквивалент воздуха:

$$C_1 = V_1 * \rho_1 * C_{p1} \quad (4)$$

$$C_1 = 3659482 \text{ м}^3/\text{ч} * 1,185 \text{ кг/м}^3 * 1,0045 \text{ кДж/(кг * К)} = 4356000 \text{ Вт/К}$$

- тепловой поток:

$$Q = C_1(T_1' - T_1'') \quad (5)$$

$$Q = 4356000 \text{ Вт/К} * (35^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) = 8712000 \text{ Вт}$$

- водяной эквивалент жидкого аммиака:

$$C_2 = \frac{Q}{T_2'' - T_2'} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{8712000 \text{ Вт}}{19^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C}} = 792000 \text{ Вт/К}$$

Согласно [10] источнику из ресивера выходит жидкий аммиак с тепловым потоком 3168 кВт, следовательно, понадобится следующее количество аппаратов обработки воздуха:

$$N_{\text{АОВ}} = \frac{3168 * 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}}{792000} = 4 \text{ шт.}$$

6. Вычислим средний температурный напор.

а) По соотношению водяных эквивалентов  $C_1$  и  $C_2$  выбираем и вычерчиваем график изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности теплообмена для схемы противотока (рисунок 7).

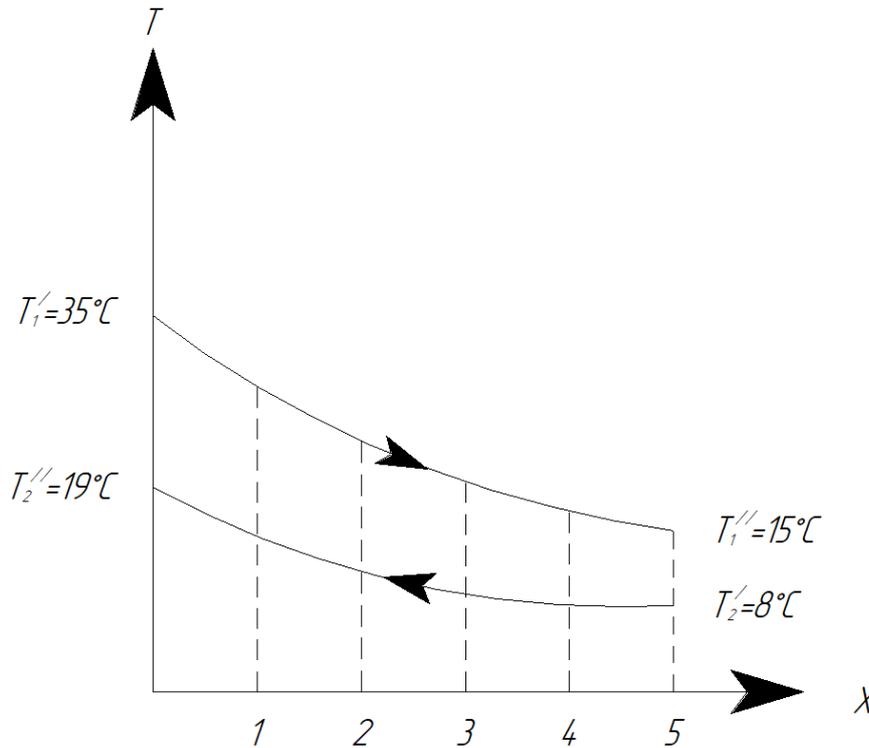


Рисунок 7 – График изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности теплообмена для схемы противотока при соотношении водяных эквивалентов

б) Вычислим наибольший и наименьший температурные напоры  $\Delta T_6$  и  $\Delta T_M$  и их отношение  $\Delta T_6 / \Delta T_M$  при  $C_1 < C_2$ , то наибольший температурный напор будет на входе аппарата и равен:

$$\Delta T_6 = T'_1 - T''_2 \quad (7)$$

$$\Delta T_6 = 35^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C} = 27^\circ\text{C}$$

А наименьший температурный напор будет на выходе аппарата и равен:

$$\Delta T_M = T''_1 - T'_2 \quad (8)$$

$$\Delta T_M = 15^\circ\text{C} - 19^\circ\text{C} = -4^\circ\text{C}$$

Отношение их будет равно:

$$\frac{\Delta T_6}{\Delta T_M} = \frac{16^\circ\text{C}}{7^\circ\text{C}} = 2,285$$

в) находим средний температурный напор для схемы противотока  $\Delta \vec{T}_{\text{cp}}$  по следующей формуле:

$$\Delta \vec{T}_{\text{cp}} = \frac{(T_1' - T_2'') - (T_1'' - T_2')}{\ln\left(\frac{T_1' - T_2''}{T_1'' - T_2'}\right)} \quad (9)$$

$$\Delta \vec{T}_{\text{cp}} = \frac{(35^\circ\text{C} - 19^\circ\text{C}) - (15^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C})}{\ln\left(\frac{35^\circ\text{C} - 19^\circ\text{C}}{15^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C}}\right)} = 9^\circ\text{C}$$

г) находим вспомогательные параметры P и R и поправку для температурного напора  $\varepsilon_{\Delta T}$  по номограмме на рисунке 8.

Определим параметр P по формуле:

$$P = \frac{T_2'' - T_2'}{T_1' - T_2'} \quad (10)$$

$$P = \frac{19 - 8}{35 - 8} = 0,407$$

Определим параметр R по формуле:

$$R = \frac{T_1' - T_1''}{T_2'' - T_2'} \quad (11)$$

$$R = \frac{35 - 15}{19 - 8} = 1,818$$

При пользовании этой номограммой от точки, определяемой параметрами P и R, проводим горизонталь до луча в левой части номограммы, соответствующего числу ходов холодного теплоносителя. Абсцисса этой точки пересечения дает значения  $\varepsilon_{\Delta T}$ .

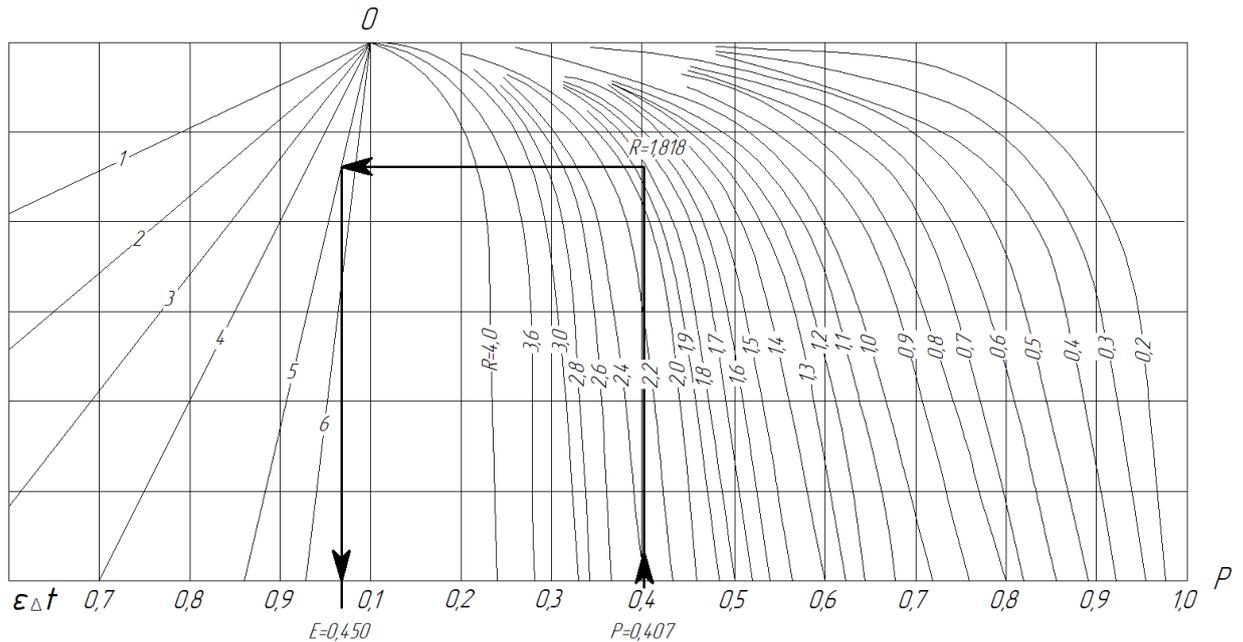


Рисунок 8 – Номограмма для определения параметров Р и R и поправку для температурного напора  $\varepsilon_{\Delta T}$

Поправка для температурного напора будет равна  $\varepsilon_{\Delta T} = 0,450$ .

д) Вычислим средний температурный напор по формуле:

$$\Delta T_{\text{ср}} = \varepsilon_{\Delta T} * \Delta \vec{T}_{\text{ср}} \quad (12)$$

$$\Delta T_{\text{ср}} = 0,450 * 9 = 4,05^{\circ}\text{C}$$

7. Определим предварительное значение коэффициента теплоотдачи от воздуха к стенкам труб  $\alpha_{1*}$ . Все величины в предварительном расчете, подлежащие уточнению, обозначаются звездочкой «\*».

а) Определим площадь проходного сечения для воздуха:

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} \quad (13)$$

$$S_T = \frac{70 + 80}{2} = 75 \text{ мм}$$

$$f_B = (S_T - d_H) * l * (Z_T + 1) \quad (14)$$

$$f_B = (0,075 - 0,065) * 2,985 * (32 + 1) = 0,985 \text{ м}^2$$

б) находим скорость движения воздуха:

$$W_1 = \frac{V_1}{f_B} \quad (15)$$

$$W_1 = \frac{55000/3600}{0,985} = 15,51 \text{ м/с}$$

в) вычислим значение числа Рейнольдса:

$$Re_1 = \frac{W_1 d_H}{\nu_1} \quad (16)$$

$$Re_1 = \frac{15,51 * 0,065}{15,53 * 10^{-6}} = 64916,29$$

г) по числу Рейнольдса и расположению труб в пучке выбирают нижеследующее уравнение подобия при поперечном обтекании пучка труб воздухом и входящие в него величины:  $A_1, n_1, \varepsilon_\psi, \varepsilon_N$ . Угол атаки  $\Psi$  для воздухоохладителя принимаем равным  $90^0$ , а значение поправки  $\varepsilon_\psi = 1$ . Так как число рядов труб  $N$  пока не известно, то в предварительном расчете принимают  $\varepsilon_{N*} = 1$ . Вычислим значение числа Нуссельта:

$$Nu_{1ж,d} = A_1 * Re_{1ж,d}^{n_1} \varepsilon_\psi * \varepsilon_N \quad (17)$$

где:  $A_1$  – коэффициент для шахматного пучка труб,  $A_1 = 0,37$ ;

$n_1$  – показатель для шахматного пучка труб,  $n_1 = 0,6$ .

Подставляем полученные данные в уравнение 17:

$$Nu_{1ж,d} = 0,37 * 64916,29^{0,6} * 1 * 1 = 285,51$$

д) вычислим предварительное значение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_{1ж,d} * \lambda_1}{d_H} \quad (18)$$

$$\alpha_1 = \frac{285,51 * 0,02635 \text{ Вт/(м * К)}}{0,065 \text{ м}} = 115,74 \text{ Вт/(м}^2 * \text{К)}$$

При числе рядов труб  $N > 10$  окончательное значение коэффициента теплоотдачи принимаем:

$$\alpha_1 = \alpha_{1*}$$

8. Определим предварительное значение коэффициента теплоотдачи от стенок труб к жидкому аммиаку  $\alpha_{2*}$ . Для определения коэффициента теплоотдачи от внутренней поверхности труб к жидкому аммиаку  $\alpha_2$  необходимо знать площадь проходного сечения для жидкого аммиака  $f_2$ , чтобы найти скорость движения жидкого аммиака  $W_2$ , а затем и число

Рейнольдса  $Re_2$ . Но число труб в пучке и проходное сечение для аммиака пока не известны. Поэтому последующий расчет выполняем в следующем порядке.

а) Зададимся предварительным значением коэффициента теплопередачи  $K_* < \alpha_{1*}$ , так как из формулы  $K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$  видно, что коэффициент теплопередачи всегда меньше наименьшего из коэффициентов теплоотдачи. Для воздухоохладителя обычно  $\alpha_1 \ll \alpha_2$ . Поэтому в качестве предварительного значения коэффициента теплопередачи целесообразно принять  $K_* = 0,9 * \alpha_{1*}$ . В общем случае выбор  $K_*$  является произвольным.

б) С помощью уравнения теплопередачи найдем предварительное значение площади поверхности теплообмена:

$$F_* = \frac{Q}{K_* * \Delta T_{cp}} \quad (19)$$

$$F_* = \frac{8712000 \text{ Вт}}{0,9 * 115,74 * 4,05} = 20650,80 \text{ м}^2$$

И число рядов труб в пучке:

$$N_* = \frac{F_*}{\pi * d_H * l * Z_T} \quad (20)$$

$$N_* = \frac{20650,80}{3,14 * 0,065 * 2,985 * 32} = 1059,25 \approx 1060 \text{ шт.}$$

где за расчетный диаметр при расчете воздухоохладителя принимали наружный диаметр труб  $d_H$ , со стороны которого, коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  значительно меньше, чем  $\alpha_2$  со стороны внутреннего диаметра.

Определим проходное сечение для жидкого аммиака:

$$f_{2ам.} = \frac{\pi d_{вн}^2}{4} * \frac{N_* * Z_T}{x} \quad (21)$$

$$f_{2ам.} = \frac{3,14 * 0,020^2}{4} * \frac{1060 * 32}{5} = 2,13 \text{ м}^2$$

в) Найдем объемный расход жидкого аммиака:

$$V_2 = \frac{C_2}{C_{p2} * p_2} \quad (22)$$

$$V_2 = \frac{792000 \text{ кВт/К}}{4,6914 \text{ кДж/(кг * К)} * 618,12 \text{ кг/м}^3} = 273,11 \text{ м}^3/\text{ч}$$

г) определим предварительные значения скорости жидкого аммиака и числа Рейнольдса:

$$W_2 = \frac{V_2}{f_{2\text{ам.}}} \quad (23)$$

$$W_{2*} = \frac{273,11 \text{ м}^3/\text{ч}}{2,13 \text{ м}^2} = 128,22 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$Re_{2\text{ж},d*} = \frac{W_{2*} * d_{\text{вн}}}{v_2} \quad (24)$$

$$Re_{2\text{ж},d*} = \frac{128,22 \text{ м}^3/\text{ч} * 0,020}{0,24735 * 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{с}} * 3600} = 2879,86$$

д) в зависимости от турбулентного течения (т. к.  $Re_2 = 2879,86 < 10000$ ) жидкого аммиака выбираем нижеследующее уравнение подобия для вынужденного движения в трубах и входящие в него величины:  $A_2, m, n_2$ .

$$Nu_{2\text{ж},d} = A_2 * Re_{2\text{ж},d*}^m * Pr_{2\text{ж}}^{0,43} * \varepsilon_{T_2} * \varepsilon_l * \varepsilon_R \quad (25)$$

где:  $A_2$  – коэффициент при турбулентном течении жидкого аммиака,  $A_2 = 0,021$ ;

$m$  – показатель степени при турбулентном течении жидкого аммиака,  $m = 0,8$ ;

Температурную поправку  $\varepsilon_{T_2}$  определяется по формуле:

$$\varepsilon_{T_2} = \left( \frac{Pr_{2\text{ж}}}{Pr_{2\text{с}}} \right)^{0,25} \quad (26)$$

$$\varepsilon_{T_2} = \left( \frac{1,483}{1,4167} \right)^{0,25} = 1,011$$

где:  $Pr_{2\text{ж}}$  – число Прандтля жидкого аммиака при температуре  $14,5^\circ\text{C}$ ,  $Pr_{2\text{с}} = 1,483$ ;

$Pr_{2\text{с}}$  – число Прандтля охлаждающего жидкого аммиака при температуре стенки  $14,65^\circ\text{C}$ ,  $Pr_{2\text{с}} = 1,4167$ .

Поправку на длину труб (таблица 1 или приложение 2) [1]  $\varepsilon_l$  (при  $\frac{l}{d_{\text{вн}}} = \frac{2,985}{0,065} = 45,92 \geq 50$ ), то этот фактор не учитывают и принимают  $\varepsilon_l = 1$ .

Поправка на кривизну труб  $\varepsilon_R$  учитывает увеличение коэффициента теплоотдачи в изогнутых трубах за счет дополнительной турбулизации потока. Для змеевиковых труб поправку  $\varepsilon_R$  определяют по формуле:

$$\varepsilon_R = 1 + 1,77 * \frac{d_{\text{вн}}}{R} \quad (27)$$

где:  $R$  – радиус кривизны труб,  $R = 30$  мм.

$$\varepsilon_R = 1 + 1,77 * \frac{0,020}{0,030} = 2,18$$

Полученные значения подставим в формулу 25:

$$Nu_{2\text{ж},d} = 0,021 * 2879,86^{0,8} * 1,483^{0,43} * 1,011 * 1 * 2,18 = 32,10$$

е) по числу Нуссельта определим предварительное значение коэффициента теплоотдачи от стенок труб к жидкому аммиаку:

$$\alpha_{2*} = \frac{Nu_{2\text{ж},d} * \lambda_2}{d_{\text{вн}}} \quad (28)$$

$$\alpha_{2*} = \frac{32,10 * 0,4819 \text{ Вт}/(\text{м} * \text{К})}{0,020 \text{ м}} = 773,45 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

9. Методом последовательных приближений определим расчетный коэффициент теплопередачи.

а) найдем расчетный коэффициент теплопередачи:

$$K_p = \frac{\alpha_1 * \alpha_{2*}}{\alpha_1 + \alpha_{2*}} \quad (29)$$

$$K_p = \frac{115,74 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К}) * 773,45 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})}{115,74 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К}) + 773,45 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})} = 100,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

### 3.1.2 Конструктивный расчет аппарата обработки воздуха

Конструктивный расчет АОВ будет выполнен по учебно-методическому руководству [6].

Для обеспечения надежной работы воздухоохладителя при загрязнении поверхности теплообмена в процессе эксплуатации вводят поправку на загрязнение труб  $\eta_3 = 0,75 \div 0,85$ .

Все величины обозначим индексом  $k$  (конструктивные).

а) найдем коэффициент теплопередачи:

$$K_k = \eta_3 * K_p \quad (30)$$

$$K_k = 0,80 * 100,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К}) = 80,54 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

б) поверхность теплообмена:

$$F_k = \frac{Q}{K_k * \Delta T_{cp}} \quad (31)$$

$$F_k = \frac{792000 \text{ Вт}}{80,54 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К}) * 4,05^\circ\text{С}} = 2428,06 \text{ м}^2$$

в) число рядов труб:

$$N_k = \frac{F_k}{\pi * d_H * l * Z_T} \quad (32)$$

$$N_k = \frac{2428,06 \text{ м}^2}{3,14 * 0,020 * 2,985 * 32} = 313,64 \approx 314 \text{ шт.}$$

В таблице 3 написано, что в одну секцию установлено 40 оребренных труб, следовательно, понадобится 8 секций.

Поверхность всего трубного элемента равна:

$$f_6 = l * N_k * f \quad (33)$$

$$f_6 = 2,985 * 314 * 1,17 = 1117,58 \text{ м}^2$$

где:  $f$  – поверхность 1 м трубы,  $f = 1,17 \text{ м}^2$  (таблица 3).

г) ширина рабочей части одного аппарата:

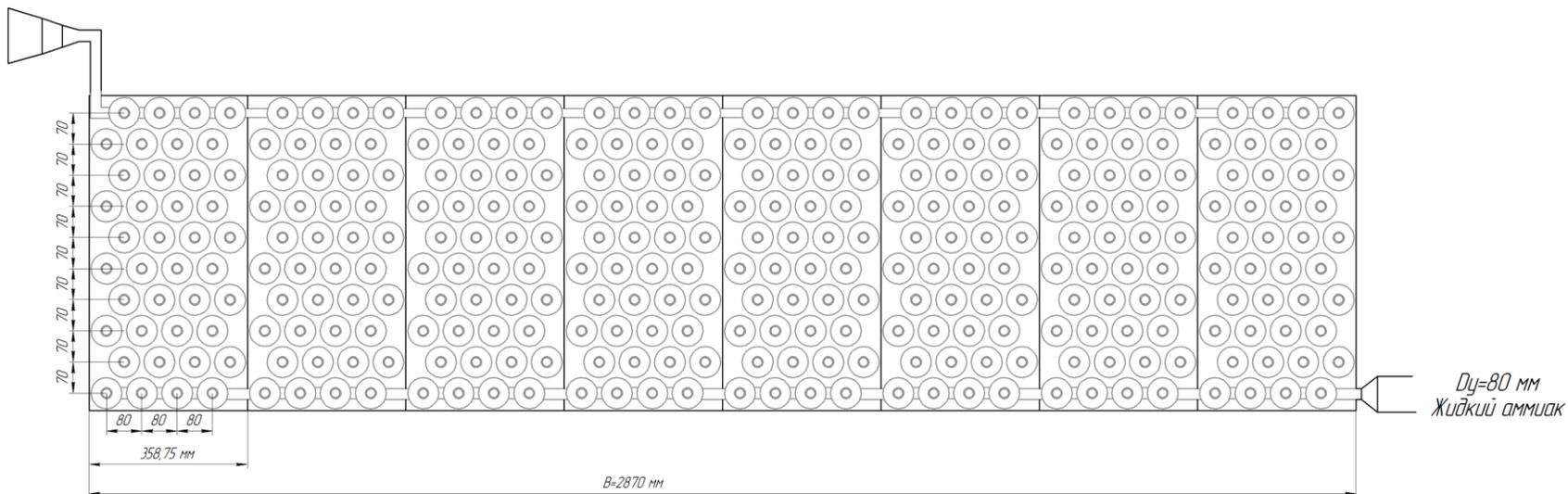
$$B = S_1 * (N_k + 1) = 0,070 * (320/8 + 1) = 2,87 \text{ м}$$

д) длина рабочей части:

$$L = S_2 * (N_k + 1) = 0,080 * (320/8 + 1) = 3,28 \text{ м}$$

Вычерчиваем проектируемый аппарат обработки воздуха согласно полученным расчетам.

$D_u=125$  мм  
Газообразный аммиак



Количество змеевиков в одной секции 4.  
Общее количество змеевиков 32 шт.  
Общее количество труб в одной секции 40 шт.  
Количество труб в теплообменнике 320 шт.

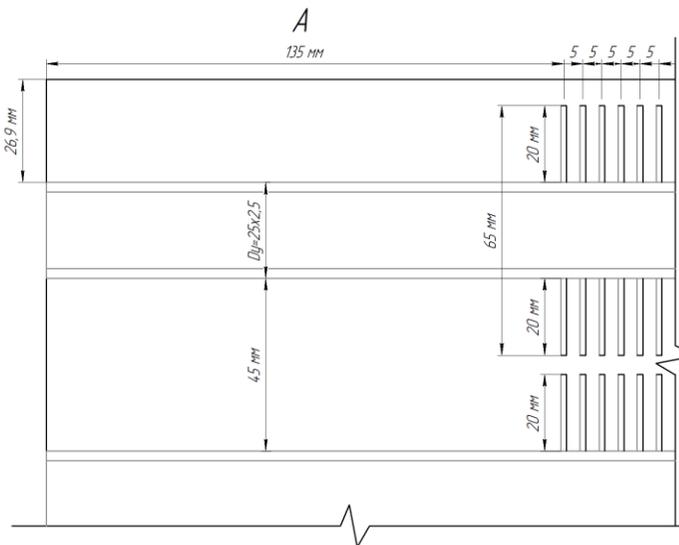
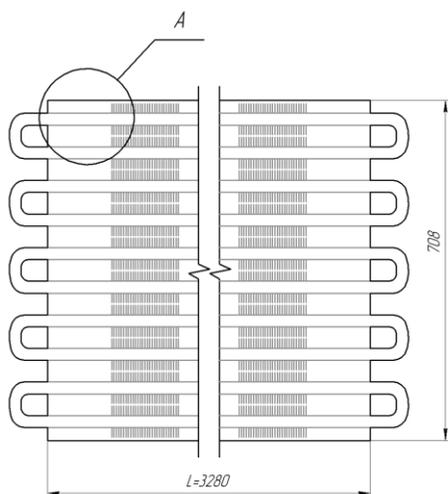


Рисунок 6 – Проектирование аппарата обработки воздуха

### 3.2 Расчет геометрического объема циркуляционного защитного ресивера

Подача аммиака в защитный ресивер горизонтального типа осуществляется сверху и совмещает в себе функции отделителя жидкости от пара. Поэтому расчет геометрического объема циркуляционного ресивера следует выполнить по следующей формуле [5]:

$$V_{з.р.} > V_c \cdot 0,6, \text{ м}^3$$

где:  $V_c$  – суммарный геометрический объем устройств охлаждения и технологических аппаратов (для одной температуры кипения  $t_0=8^\circ\text{C}$ ):

$$V_c = V_{тр.1м} \cdot l \cdot N_k \cdot N_{АОВ} = 0,0015 \cdot 3,2 \cdot 320 \cdot 4 = 6,14 \text{ м}^3$$

где:  $V_{тр.1м}$  – объем одного метра трубы при диаметре 25 мм,  $V_{тр.1м} = 0,0015 \text{ м}^3$ ;

$l$  – длина одной трубы,  $l = 3,2 \text{ м}$ .

Тогда геометрический объем защитного циркуляционного ресивера равен:

$$V_{з.р.} > 6,14 \cdot 0,6 = 3,68 \text{ м}^3$$

Подбираем защитный циркуляционный ресивер производителя «Химхолодсервис», емкостью  $V_{з.р.} = 4,0 \text{ м}^3$ , марки РЦЗ-4,0.

### 3.3 Расчет аммиачного циркуляционного насоса для холодильной установки

Для перекачки хладагентов к АОВ хорошо зарекомендовали себя горизонтальные центробежные насосы фирмы Hermetic-Pumpen серии CNF. Осуществляют перекачку таких хладагентов как аммиак, диоксид углерода, метанол, силиконовое масло и водно-гликолевые растворы.

«Насосы имеют одноступенчатую конфигурацию, радиальное рабочее колесо, встроенный полностью герметизированный электродвигатель переменного тока. Необслуживаемые и стойкие к износу гидродинамические

подшипники скольжения. Для охлаждения мотора и смазки подшипников используется рабочая среда. Корпус изготовлен из чугуна с шаровидным графитом, крыльчатки из серого чугуна, ротор футерован нержавеющей хром-никель-молибденовой сталью с применением метода ударной экструзии». [7].

Объемная подача насоса:

$$V_{\text{на}} = m * V_{\text{ж}} * \alpha = 10000 * 0,0015937 * 5 = 79,69 \text{ м}^3/\text{ч}$$

где:  $m$  – массовая подача жидкого аммиака,  $m = 10000$  кг/ч [10];

$V_{\text{ж}}$  – удельный объем жидкого аммиака при  $t_0 = 8^\circ\text{C}$ ,  
 $V_{\text{ж}} = 0,0015937 \text{ м}^3/\text{кг}$  [17];

$\alpha$  – норма заполнения ресивера жидким аммиаком, при верхней подаче  
 $\alpha = 3 \dots 7$  [7].

По каталогу [4] выбираем два рабочих герметичных центробежных насосов марки CNF 50-160 AGX 4.5 производительностью 8-60 м<sup>3</sup>/ч при расчетной производительности  $79,69 / 2 = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ , при напоре 30 м.

### 3.4 Расчет вертикального гравитационного сепаратора

Исходные данные:

Дебит парожидкостного аммиака при нормальных условиях:  $V = 382 \text{ м}^3/\text{сут}$  [7];

Давление в сепараторе:  $P = 1,6 \text{ МПа}$  [10,11];

Температура в сепараторе:  $t = 8^\circ\text{C}$ ;

Диаметр капель жидкости:  $d = 0,5 \text{ см}$  [10,11];

Плотность парожидкостного аммиака при температуре  $t = 8^\circ\text{C}$ :  
 $\rho_0 = 0,7511 \text{ кг}/\text{м}^3$  [3];

Плотность парожидкостного аммиака при давлении  $P = 1,6 \text{ МПа}$  и температуры  $t = 8^\circ\text{C}$  в сепараторе:  $\rho_{\text{н}} = 627,38 \text{ кг}/\text{м}^3$  [2];

Относительная плотность парожидкостного аммиака:

$$\rho = \frac{\rho_0}{\rho_B} = \frac{0,7511 \text{ кг/м}^3}{1,2562 \text{ кг/м}^3} = 0,598 \text{ кг/м}^3$$

где:  $\rho_B$  – плотность воздуха при нормальных условиях,  $\rho_B = 1,2562 \text{ кг/м}^3$  [2].

По графикам на рисунке 7 найдем псевдокритическое давление и температуру (кривая 2).

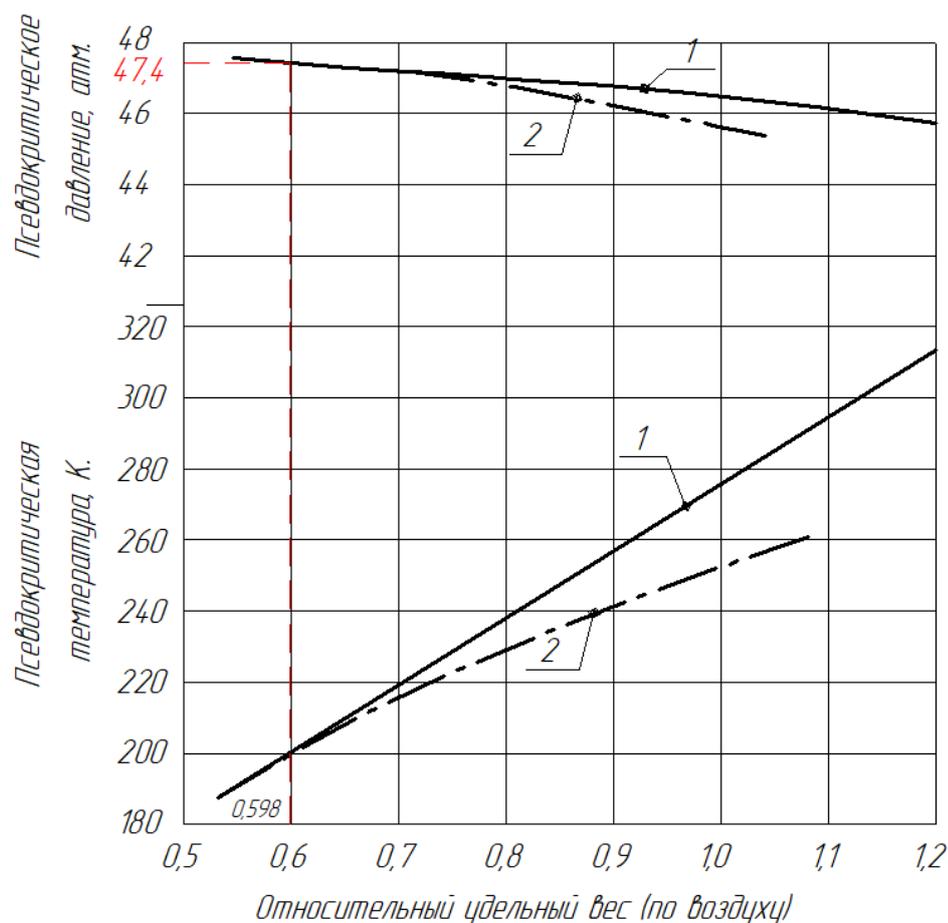


Рисунок 7 – Зависимость псевдокритических давлений и температур от удельного веса газа: 1 – для обычных паров и жидкостей; 2 – для парожидкостных смесей

Получаем:

$$P_{п.к.} = 47,4 \text{ кг/м}^3; T_{п.к.} = 200 \text{ К}$$

Далее находим приведенные давление и температуру:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P}{P_{\text{п.к.}}} = \frac{16}{47,2} = 0,339$$

$$T_{\text{пр}} = \frac{T}{T_{\text{п.к.}}} = \frac{273 + 8}{200} = 1,405$$

По графикам Брауна рисунка 8 находим коэффициент сжимаемости парожидкостного аммиака  $z$ .

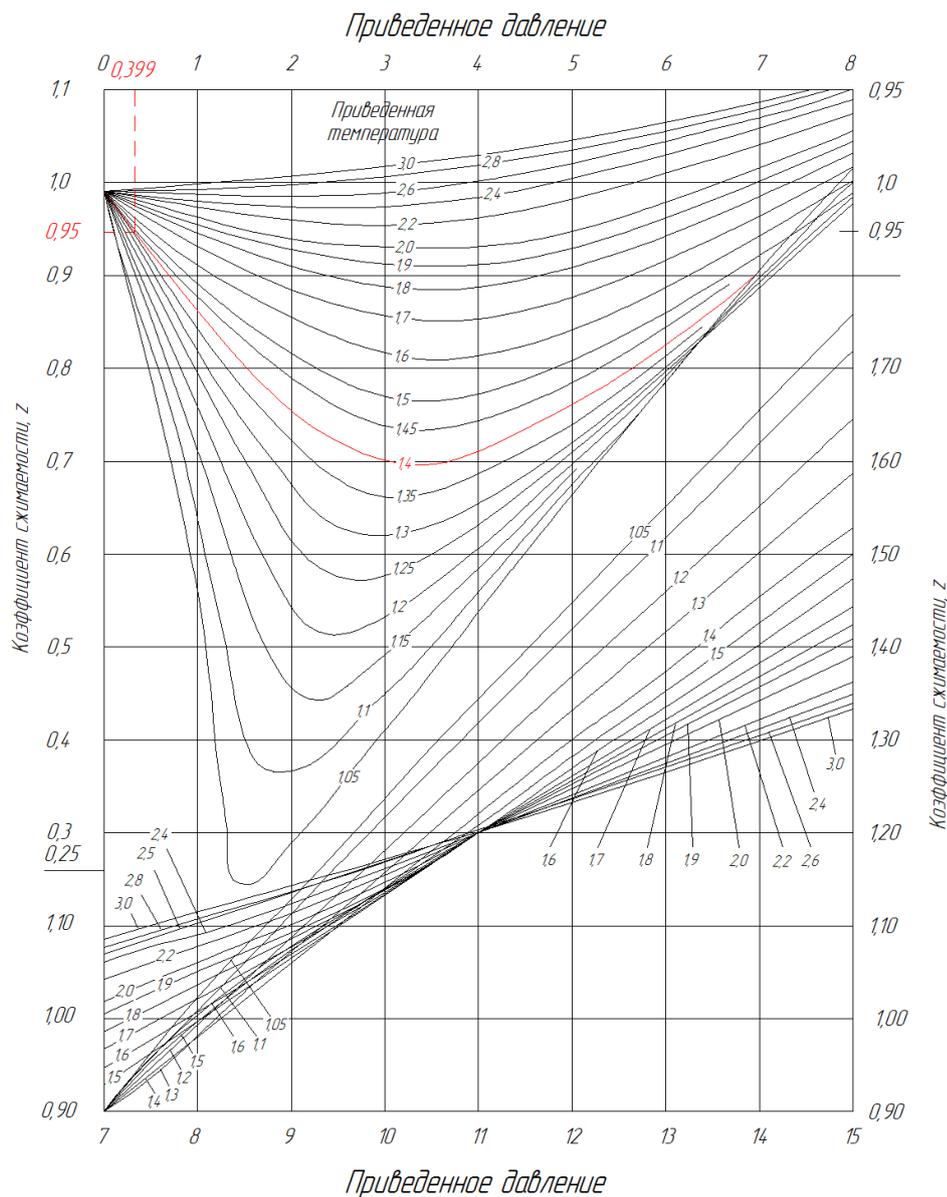


Рисунок 8 – Графики Брауна для определения коэффициента сжимаемости парожидкостного аммиака

Получаем  $z = 0,95$

Плотность парожидкостного аммиака, по приведенным условиям в сепараторе, находится по формуле:

$$\rho_r = \rho_0 * \frac{P * T_0}{P_0 * T * z} = 0,7511 * \frac{1,6 * 273}{0,103 * 281 * 0,95} = 11,93 \text{ кг/м}^3$$

Определим кинематическую вязкость парожидкостного аммиака, относительно к условиям в сепараторе:

$$\begin{aligned} v_r &= v_0 * z * \frac{P_0 * (T_0 + C_r)}{P * (T + C_r)} * \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{2}} = \\ &= 12,9 * 0,95 * \frac{0,103 * (273 + 210)}{1,6 * (281 + 210)} * \left(\frac{281}{273}\right)^{\frac{1}{2}} = 0,787 * 10^{-6} \end{aligned}$$

где:  $v_0$  – кинематическая вязкость для парожидкостного аммиака,  $v_0 = 12,9 * 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;

$C_r$  – температура постоянного газа,  $C_r = 210^\circ\text{С}$ .

Внутренний диаметр сепаратора:

$$\begin{aligned} D &= \sqrt{\frac{V * z * T * v_r * \rho_r}{82 * P * d^2 * (\rho_n - \rho_r)}} = \sqrt{\frac{382 * 0,95 * 281 * 0,787 * 11,93}{82 * 1,6 * 10^6 * 0,005^2 * (627,38 - 11,93)}} \\ &= 0,69 \text{ м} \end{aligned}$$

По ГОСТ 11987-85 «Аппараты выпарные трубчатые стальные» выбираем сепаратор по таблице 2 диаметром  $D = 800 \text{ мм}$ .

Найдем пропускную способность сепаратора по парожидкостному аммиаку:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ж}} &= 3694 * \frac{D^2 * (\rho_{\text{ж}} - \rho_r) * d^2}{v_r * \rho_r} \\ &= 3694 * \frac{0,80^2 * (627,38 - 11,93) * 25 * 10^{-6}}{0,787 * 11,9} = 3,88 \text{ м}^3/\text{сут} \end{aligned}$$

Скорость движения парожидкостного аммиака в вертикальном сепараторе:

$$\begin{aligned} V_r &= 5,56 * 10^{-3} * \frac{V * T * z}{D^2 * P} = 5,56 * 10^{-3} * \frac{382 * 281 * 0,95}{0,80^2 * 1,6 * 10^6} \\ &= 0,553 * 10^{-3} \text{ м/с} \end{aligned}$$

Скорость осаждения капель жидкого аммиака в сепараторе:

$$I_{\text{ч}} = \frac{d^2 * (\rho_{\text{н}} - \rho_r) * g}{18 * v_r * \rho_r} = \frac{25 * 10^{-6} * (627,38 - 11,93) * 9,81}{18 * 0,787 * 11,93}$$

$$= 0,893 * 10^{-3} \text{ м/с}$$

Для эффективной работы сепаратора должно соблюдаться следующее соотношение:

$$I_{\text{ч}} = 0,893 * 10^{-3} \text{ м/с} \geq V_r * 1,2 = 0,553 * 10^{-3} * 1,2$$

$$= 0,664 * 10^{-3} \text{ м/с}$$

Толщину стенки цилиндрической части сепаратора находим по формуле, приняв  $D$  и  $D_{\text{ср}}$ :

$$S = \frac{P * D}{2 * R_z * \varphi} + C = \frac{1,6 * 10^6 * 0,80}{2 * 245 * 10^6 * 0,85} + 0,004 = 0,0071 \text{ м} = 7,1 \text{ мм}$$

где:  $R_z$  – допускаемое напряжение,  $R_z = \frac{295}{1,2} = 245 \text{ МПа}$ , для стали 35;

$\varphi$  – коэффициент прочности сварного шва,  $\varphi = 0,85$  при подварке стыковых швов с внутренней стороны и  $\varphi = 0,65$  без подварки;

$C$  – запас на коррозию,  $C = 0,004 \text{ м}$ .

Уточним толщину стенки, полагая  $D_{\text{ср}} = D + S = 0,80 + 0,0071 = 0,8071 \text{ м}$ :

$$S = \frac{P * D_{\text{ср}}}{2 * R_z * \varphi} + C = \frac{1,6 * 10^6 * 0,8071}{2 * 245 * 10^6 * 0,85} + 0,004 = 0,0071 \text{ м} = 7,1 \text{ мм}$$

Принимаем, что  $H = 0,25 \text{ м}$  и  $H/D = 0,25/0,69 = 0,36$  по рисунку 9 находим значение  $u_3$ .

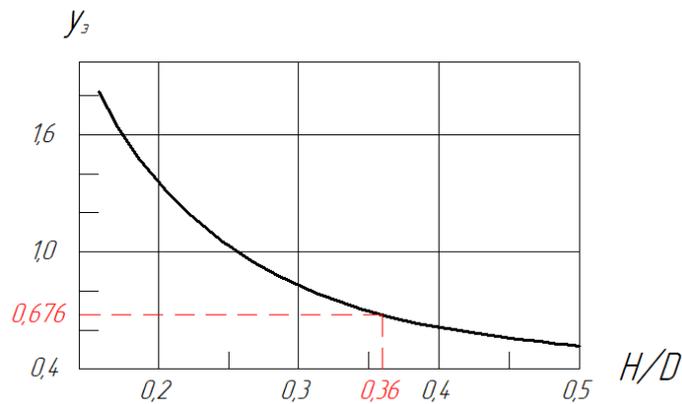


Рисунок 9 – Коэффициенты перенапряжения для расчета эллиптических днищ

Получаем  $y_3 = 0,676$ .

Тогда:

$$S = \frac{P * D_{cp} * y_3}{2 * R_z \varphi + P * y_3} + 0,004$$

$$= \frac{1,6 * 10^6 * 0,8071 * 0,676}{2 * 245 * 10^6 * 0,85 + 1,6 * 10^6 * 0,676} + 0,004$$

$$= 0,0061 \text{ м} = 6,1 \text{ мм}$$

Напряжение, возникающее в эллиптическом днище:

$$\sigma = \frac{P * D_{cp} * y_3}{2 * \varphi * (S - C)} = \frac{1,6 * 10^6 * 0,8071 * 0,676}{2 * 0,85 * (0,0061 - 0,004)} = 244,5 * 10^6 \text{ Н/м}^2$$

Толщину стенки наклонно конического днища определим по формуле, полагая, что  $\alpha = 35^\circ$ :

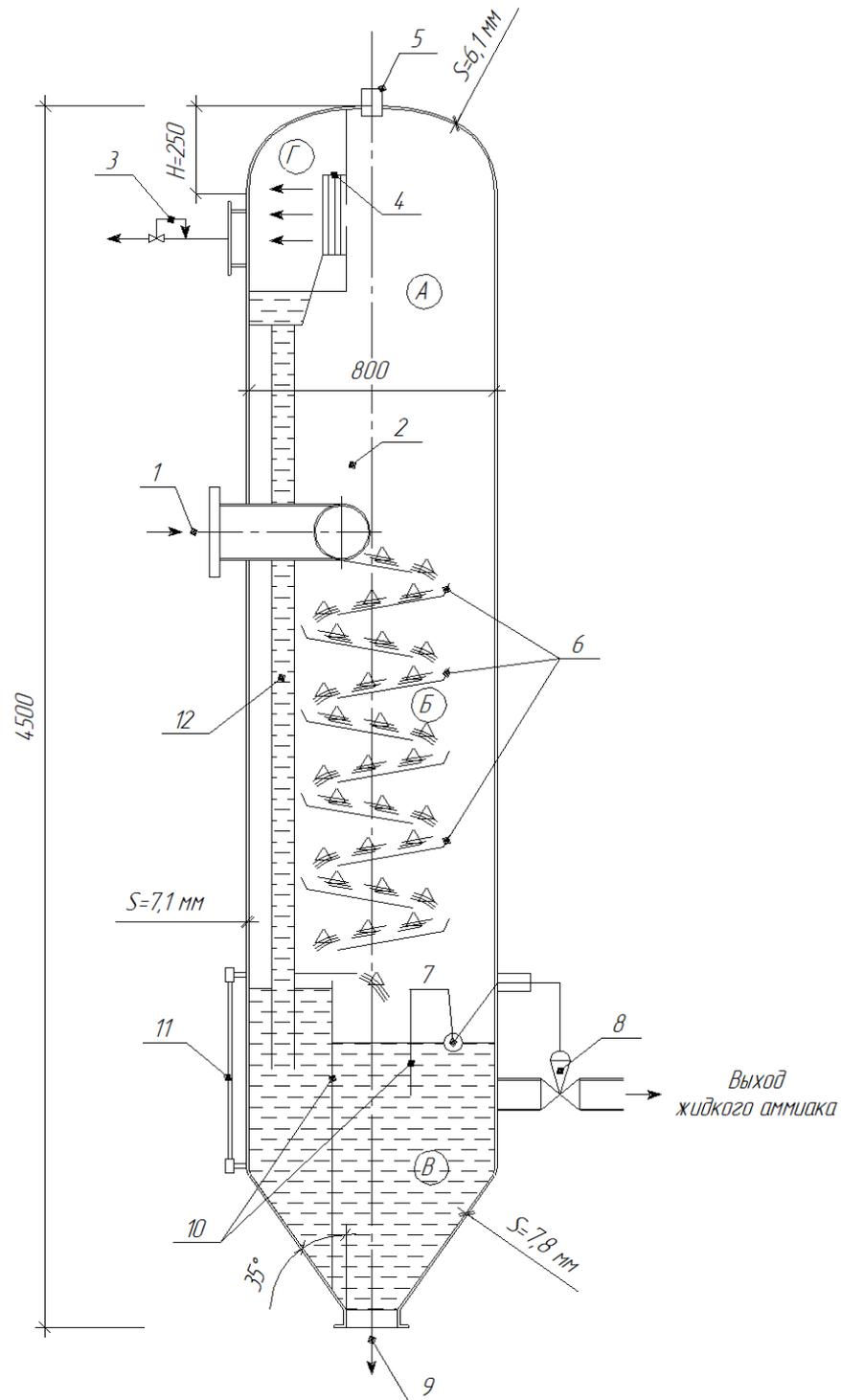
$$S = \left( \frac{P * D}{2 * R_z * \varphi * \cos 30^\circ} \right) = \frac{1,6 * 10^6 * 0,80}{2 * 245 * 10^6 * 0,85 * 0,819} + 0,004$$

$$= 0,0078 \text{ м} = 7,8 \text{ мм}$$

Высота вертикального сепаратора обычно не превышает 4-5 его диаметра, поэтому:

$$H_{сеп} = 0,8 * 5 = 4,50 \text{ м}$$

По полученным расчетам выполним чертеж вертикального сепаратора.



1 – патрубок ввода парожидкостной смеси; 2 – раздаточный коллектор; 3 – регулятор давления на линии отвода паров аммиака; 4 – каплеуловитель (жалюзийный); 5 – предохранительный клапан; 6 – наклонные полки; 7 – поплавок; 8 – регулятор уровня на линии отвода; 9 – линия сброса шлама; 10 – перегородки; 11 – уровнемерное стекло; 12 – дренажная труба; А – основная сепарационная секция; Б – осадительная секция; В – секция сбора жидкого аммиака; Г – секция каплеудаления.

Рисунок 10 – Проектируемый чертеж вертикального сепаратора

Вывод по расчетной части: в расчетной части выполнен тепловой баланс и конструктивный расчет аппарата обработки воздуха, а также выполнен расчет защитного циркуляционного ресивера, аммиачные горизонтальные центробежные насосы и вертикальный гравитационный сепаратор, который способен осадить образовавшиеся пар после прохождения аппарата обработки воздуха из аммиачной жидкости, а также предотвратить капельный унос, с помощью жалюзийной решетки.

## Заключение

В выпускной квалификационной работе была рассмотрена стадия гранулирования аммиачной селитры цеха № 3 предприятия ПАО «КуйбышевАзот».

В технологической части была рассмотрена площадка под проектную установку, которая описывается наличием технологических коммуникаций, а именно жидкостной и парогазовой аммиачных магистралей, к которым имеется возможность подключить защитный циркуляционный ресивер по патенту № 138138U2. Данное решение позволит отказаться от применения компрессорного оборудования для совершения работы холодильного цикла и получить эффект охлаждения за счёт использования разницы энтальпий существующих технологических аммиачных потоков.

Изучили технологическую схему, применяемую в данном цехе и на основании исследований, были выявлены недостатки на стадии гранулирования, связанные с температурным режимом воздуха, подаваемого в грануляционные башни.

Предложен вариант оптимизации системы охлаждения, направленный на решение проблемы с температурным режимом воздуха, который подается в грануляционные башни, при этом производительность аммиачной селитры увеличится до проектной мощности 1700 т./сут.

Систему охлаждения в технологическом плане можно рассматривать, как участок существующей трубопроводной сети использующихся реагентов, на котором специальным образом организованы условия для дросселирования потока высокого давления и испарения жидкой фазы аммиака. С учетом специфики технологического процесса и уровня технической оснащённости существующего производства, рассматриваемый участок не является сложным или уникальным объектом, а его схемное решение типично для решения подобных задач.

Согласно расчетам, проектируемая установка состоит из:

- защитный циркуляционный ресивер компании «Химхолодсервис», емкостью  $V_{з.р.} = 4,0 \text{ м}^3$ , марки РЦЗ-4,0;

- два горизонтального центробежного насоса фирмы Hermetic-Pumpen серии CNF, марки CNF 50-160 AGX 4.5 производительностью  $8-60 \text{ м}^3/\text{ч}$ , при напоре 30 м;

- 4 теплообменника, каждый из которых имеет 8 горизонтальных секций. Общее число труб одного теплообменника составляет 320 шт. Ширина рабочей части одного теплообменника составляет 2,87 м, а длина рабочей части 3,28 м. Один аппарат охлаждает воздух в количестве  $55\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

- вертикальный гравитационный сепаратор диаметром 0,69 м и высотой 3,45 м. Толщина стенки аппарата составляет 7,2 мм.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Барулин А. Е. Подходы к увеличению мощности агрегатов производства аммиачной селитры [Электронный ресурс]: Журнал Химическая техника. URL: <https://chemtech.ru/podhody-k-velichenijumoshhnosti-agregatov-proizvodstva-ammiachnoj-selitry/> (дата обращения: 08.08.2023).
2. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Наука, 1972. – 721 с.
3. ГОСТ 2 – 2013 «Селитра аммиачная. Технические условия».
4. Каталог горизонтальных центробежных насосов компании Hermetic-Pumpen URL: <https://vecgroup.ru/equipment/catalog/nasosy-hermetic-pumpen/nasosy-dlya-khladagentov-hermetic-pumpen-serii-cnf/?ysclid=llw3rnov8c792096957>.
5. Кисс В.В., Евдокимов А.А. Обеспечение безопасности при проектировании аммиачных холодильных установок: Учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 81 с.
6. Клементьев М. Ф., Журавлев А. А. Тепловой расчет воздухоохладителя: Учебно-методическое руководство. – Севастополь: СНИЯЭиП. 2002. – 40 с.
7. Лашутина Н. Г., Верховая Т. А., Суедов В. П. Холодильные машины и установки. – М.: КолосС, 2006. – 440 с.: ил. – (Учебники и учеб. пособия для студентов средних специальных учеб. заведений). ISBN 5 – 9532 – 0345 – 4.
8. Министерство сельского хозяйства. О ходе приобретения минеральных удобрений в 2020 году и планы по приобретению до 2025 года. М., 2020.
9. ПАО «КуйбышевАзот» [Электронный ресурс]: <http://www.kuazot.ru/rus/ecology/info> (дата обращения 15.05.2022).

10. Паспорт и техническое описание. 024.11.03 - 602 – ИОС 7.2. Книга 2«Система охлаждения воздуха перед подачей его в аппараты кипящего слоя гранбашен цеха аммиачной селитры».

11. Паспорт и техническое описание. Аппарат обработки воздуха. АОВ 1000.00.00.000 П.

12. Патент № 138119U1 Российская Федерация, МПК F28D 1/04 (2006.1). Аппарат обработки воздуха : № 2013138813/06 : заявл. 20.08.2013 : опубл. 27.02.2014/ Огарков А. А., Аникушин С. А., Лебедев П. В., Федоров В. И.

13. Патент № 138138U2 Российская Федерация, МПК B01J 21/00 (2006.1), C05C 9/00 (2006.1). Холодильная система непосредственного кипения : № 2013138814/13 : заявл. 20.08.2013 : опубл. 27.02.2014/ Огарков А. А., Аникушин С. А., Лебедев П. В., Федоров В. И.

14. Патент № 14273U1 Российская Федерация, МПК F25D 9/00 (2006.1). Воздухоохладитель холодильной установки с автоматической системой оттайки : № 2000107317/20 : заявл. 28.03.2000 : опубл. 10.07.2000/ Овчаренко В. С., Афонский В. П., Баранов А. И.

15. Патент № 2401247C2 Российская Федерация, МПК C01C 1/18 (2006.1). Способ производства аммиачной селитры и фильтрующий элемент для тонкой очистки паровоздушной смеси перед сбросом в атмосферу от аммиачной селитры и аммиака : № 2008138617/15 : заявл. 30.09.2008 : опубл. 10.10.2010/ Копиевский И. В., Ферд М. Л., Дрибинская А. Н.

16. Попова В. Н. Российский рынок минеральных удобрений в условиях экономических санкций // Инженерные агропромышленные науки – С. 125.

17. Справочник химика 21, стр. 80 табл. 29 URL: <https://www.chem21.info/tabs/36736/>

18. Теплофизические свойства аммиака. Голубев И. Ф., Кияшова В. П., Перельштейн И. И., Парушин Е. Б. М., Издательство стандартов, 1978, 264 с. (ГССД).

19. ТУ 113-03-27-52-83 Удобрения жидкие азотные (КАС).
20. Choi C. S., Mapes J. E., Prince E. The structure of ammonium nitrate (IV) //Acta Crystallographica Section B: Structural Crystallography and Crystal Chemistry. – 1972. – Т. 28. – №. 5. – С. 1357-1361.
21. Dechy N. et al. First lessons of the Toulouse ammonium nitrate disaster, 21st September 2001, AZF plant, France //Journal of hazardous materials. – 2004. – Т. 111. – №. 1-3. – С. 131-138.
22. Homeland Security to Regulate Fertilizer Chemical Used in Oklahoma, Norway Bombings. Associated Press (2 августа 2011) (дата обрац. 10.08.2023 г.).
23. Pittman W. et al. Lessons to be learned from an analysis of ammonium nitrate disasters in the last 100 years //Journal of hazardous materials. – 2014. – Т. 280. – С. 472-477.