

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

Институт химии и инженерной экологии

(наименование института полностью)

Кафедра «Рациональное природопользование и ресурсосбережение»

(наименование кафедры полностью)

18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии,  
нефтехимии и биотехнологии

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов

(направленность (профиль)/специализация)

### **БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему Модернизация компрессорной установки с целью снижения  
энергозатрат на примере предприятия ООО «СИБУР Тольятти»

Студент

Н.Н. Башев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Ю.В. Чариков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

В.В. Петрова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой к.п.н., доцент М.В. Кравцова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019г.

Тольятти 2019

## АННОТАЦИЯ

Бакалаврскую работу выполнил: Башев Н.Н.

Тема работы: Модернизация компрессорной установки с целью снижения энергозатрат на примере предприятия ООО «СИБУР Тольятти»

Научный руководитель: Чариков Ю.В.

Цель бакалаврской работы – Повысить энергоэффективность технологии получения холода цеха И 3-9 ООО «СИБУР Тольятти».

Пояснительная записка работы состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка используемых источников.

Во введении обосновывается актуальность проводимого исследования, описывается цель, задачи, объект и предмет исследования. В первом разделе описана существующая технология компрессорной установки стадии получения холода на ООО «СИБУР Тольятти». Во втором разделе произведен анализ действующей в ООО «СИБУР Тольятти» компрессорной установки. Определено направление модернизации действующей компрессорной установки. В третьем разделе выбрана компрессорная установка стадии получения холода, позволяющая снизить энергопотребление компрессора, обеспечить автоматическое регулирование давления процесса получения холода и повысить экологичность процесса. В четвертом разделе проведен расчет экономического эффекта от предложенного способа модернизации действующей компрессорной установки получения холода на производстве изопрен в ООО «СИБУР Тольятти».

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Анализ технологии получения холода цеха И 3-9 ООО «СИБУР Тольятти».....	6
1.1 Характеристика ООО «СИБУР Тольятти».....	6
1.2 Анализ технологической схемы производства .....	7
1.3 Анализ работы существующей компрессорной установки .....	17
2 Обоснование технического решения.....	23
3 Тепловой расчет компрессорной установки.....	33
3.1 Определение температурного режима.....	33
3.2 Подбор и расчет кожухотрубчатого конденсатора.....	34
3.3 Подбор и расчет испарителя.....	39
4 Расчет эффективности проекта.....	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	47
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	48
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	54
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	55

## **ВВЕДЕНИЕ**

Техническое перевооружение ведет не только к повышению эффективности производства, но и влечет за собой снижение влияния на окружающую среду.

Установка получения холода обеспечивает более стабильное ведение технологического процесса полимеризации каучука. Поршневые компрессоры 4-АГ, используемые в технологии получения холода на предприятии ООО «СИБУР Тольятти» в настоящее время, имеют высокое потребление электроэнергии, низкий КПД, наличие смазочного масла в сжимаемом паре холодильного агента, выходящего из компрессора. На сегодняшний день эти компрессоры физически и морально устарели. Энергетически неэффективные холодильные установки для нормальной работы требуют огромного количества электроэнергии.

С учетом всего выше сказанного можно констатировать, что снижение потребления энергоресурсов для получения холода при более низкой температуре хладагентов обеспечивает более стабильное поддержание технологического процесса полимеризации каучука. Экологический эффект от модернизации компрессорной установки стадии получения холода обеспечивается уменьшением шума, вибрации и снижением содержания смазочного масла в сжижаемом паре.

В этой связи модернизация компрессорной установки, направленная на снижение энергетических затрат является наиболее перспективным направлением.

Цель: Повысить энергоэффективность технологии получения холода цеха И 3-9 ООО «СИБУР Тольятти»

Задачи работы:

1. Проанализировать возможность модернизации установки получения холода.

2. Предложить энергоэффективную технологию получения холода и ее аппаратное оформление
3. Подтвердить расчетами эффективность технического решения

# **1 Анализ технологии получения холода цеха И 3-9 ООО «СИБУР Тольятти»**

## **1.1 Характеристика ООО «СИБУР Тольятти»**

ООО «СИБУР Тольятти» - дочернее общество СИБУРа и одно из крупнейших предприятий нефтехимического комплекса России, расположенное в г. Тольятти.

На предприятии действуют шесть производств:

- производство сополимерных каучуков мощностью 60 тыс. тонн в год;
- производство бутилкаучука мощностью 53 тыс. тонн в год;
- производство бутадиена мощностью 80 тыс. тонн в год и высокооктановой добавки к бензину мощностью 35 тыс. тонн в год;
- производство изопрена мощностью 90 тыс. тонн в год;
- производство изопреновых каучуков мощностью 82 тыс. тонн в год;
- производство изобутилен-изобутановой фракции мощностью 105 тыс. тонн в год и изобутилена мощностью 40 тыс. тонн в год.

«Внедрение международных стандартов ISO 14001 и ISO 50001 позволило выстроить систему управления экологической и энергетической результативностью СИБУРа, рисками воздействия на окружающую среду в условиях непрерывного ужесточения природоохранного законодательства, развития государственной политики энергосбережения, с учётом общего роста озабоченности заинтересованных сторон вопросами сохранения окружающей среды и устойчивого развития.

## 1.2 Анализ технологической схемы производства

Для стабильной работы аппаратов и соблюдения технологических режимов необходимо поддержания оптимальной температуры. Для охлаждения до температуры более низкой, чем температура окружающей среды, применяется искусственное охлаждение, которое можно осуществить с помощью любого физического процесса, связанного с отводом теплоты.

В установках искусственного холода осуществляют необходимое снижение температуры рабочего тела. По агрегатному состоянию рабочего тела холодильные установки подразделяют на газовые, газожидкостные, парожидкостные и адсорбционные (с применением твердой фазы).

Искусственное охлаждение в большинстве случаев осуществляется двумя методами:

- испарением низкокипящих жидкостей;
- расширением различных предварительно сжатых газов с помощью дросселирования или детандирования.

При испарении низкокипящих жидкостей последние охлаждаются за счет уменьшения внутренней энергии.

Дросселирование представляет собой процесс расширения газа при его прохождении через сужающее устройство, в результате чего давление газа снижается. Энергия, необходимая для расширения газа при дросселировании, когда поступление теплоты извне отсутствует, может быть получена только за счет внутренней энергии самого газа. Дроссельный эффект (эффект Джоуля - Томсона) - это изменение температуры газа при дросселировании в условиях отсутствия теплообмена с окружающей средой.

Детандирование— это расширение газа в расширительной машине - детандере. По своей конструкции этот агрегат аналогичен поршневому компрессору или турбокомпрессору. При детандировании газ охлаждается вследствие снижения внутренней энергии и совершения внешней работы.

«Хладагент представляет собой химическое вещество, предназначенное для отвода тепла от охлаждаемой среды. Для этого используют специальные легкокипящие жидкости, имеющие низкую температуру кипения при атмосферном давлении. В настоящее время широко применяются холодильные агенты аммиак и фреон-22»[1]

Выбор хладагентов для холодильных машин в России изначально осложнён труднопреодолимым противоречием между стремлением заказчиков использовать наиболее дешёвый и энергоэффективный хладагент и запретительными мерами многочисленных надзорных и контролирующих организаций. Это подразумевает применение озонобезопасных и «непарниковых» хладагентов, какими для промышленного холода являются аммиак, диоксид углерода и единичные марки весьма дорогих фреонов [39].

Энергетически неэффективные холодильные установки для нормальной работы требуют огромного количества электроэнергии. Производство энергии для данного оборудования интенсифицирует процесс глобальное потепление Земли [29].

Современные холодильные установки подразделяют на компрессорные и абсорбционные. Наибольшее распространение получили компрессорные установки.

В дипломной работе рассматривается технологический процесс, реализуемый в цехе И 3-9. Отделение И-3 входит в состав цеха И-3-9 завода по производству изопрена, СКИ.

Отделение И-3 предназначено для ректификации фракции изобутана-возврата и для получения холода параметров минус 5 °С и 0 °С.

В качестве хладагента в компрессорах этого цеха используется аммиак, который является бесцветным газом с резким запахом, обладающим раздражающим действием на слизистую оболочку. Поэтому при утечке его через утечки через неплотности можно его определить по характерному запаху. Растворимость аммиака в воде достаточно высока. Аммиак отличается очень высокой удельной теплотой парообразования, потому



находит применение в холодильных агрегатах большой мощности. Вместе с тем такие характеристики аммиака как взрывоопасность, токсичность и воспламеняемость ограничивает его применение.

Установка получения холода представляет собой холодильную машину парокомпрессионного типа с замкнутым циклом движения хладагента по обратному циклу Карно. Происходят последовательные процессы сжатия, конденсации, испарения с отбором паров и охлаждения хладоносителя. В качестве промежуточного хладоносителя используется раствор хлористого кальция в воде, иначе называемый рассол. В таблице 1 представлены физико-химические свойства используемых в цикле веществ.

Таблица 1 – Физико-химические свойства полупродуктов и энергоресурсов

Наименование сырья, материалов, полупродуктов	Государственный или отраслевой стандарт, СТП, технические условия	Показатели по стандарту, обязательные для проверки	Регламентируемые показатели	
1	2	3	4	5
Аммиак жидкий технический	ГОСТ 6221-90	Массовая доля аммиака	1 Массовая доля аммиака, %, не менее 2 Массовая доля азота, %, не менее 3 Массовая доля воды (остаток после испарения), %, не более 4 Массовая доля воды (метод Фишера), %, не более 5 Массовая концентрация масла, мг/дм <sup>3</sup> , не более 6 Массовая концентрация железа, мг/дм <sup>3</sup> , не более	99,9 - - 0,1 2,0 1,0

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
Кальций хлористый технический	ГОСТ 450-77 с изм. 1,2,3 гидратированный	Массовая доля хлористого кальция	<p>1 Внешний вид</p> <p>2 Массовая доля хлористого кальция, %, не менее</p> <p>3 Массовая доля магния в пересчете на <math>MgCl_2</math>, %, не более</p> <p>4 Массовая доля прочих хлоридов, в том числе <math>MgCl_2</math>, в пересчете на <math>NaCl</math>, %, не более</p> <p>5 Массовая доля железа, %, не более</p> <p>6 Массовая доля нерастворимого в воде остатка, %, не более</p>	<p>Чешуек и или гранулы белого цвета</p> <p>80</p> <p>не нормируется</p> <p>5,5</p> <p>не нормируется</p> <p>0,5</p>
Вода обратная	Проект	<p>Давление прямой воды</p> <p>Температура прямой воды:</p> <p>- летом</p> <p>- зимой</p>	<p>1 Давление прямой воды, кгс/см<sup>2</sup>, не менее</p> <p>2 Давление обратной воды, кгс/см<sup>2</sup>, не более</p> <p>3 Температура прямой воды:</p> <p>- летом, не более</p> <p>- зимой</p> <p>4 ХПК, мг <math>O_2</math>/л, не более</p> <p>5 Продукты производства</p> <p>6 рН</p> <p>7. Температура отработанной воды, °С, не более</p>	<p>4,2</p> <p>1,8</p> <p>25</p> <p>18÷21</p> <p>80,0</p> <p>отсутствует</p> <p>6,5÷8,5</p> <p>35,0</p>

1	2	3	4	5
Электроэнергия	ГОСТ 13 109-97		Согласно ГОСТ 13 109-97	90÷110
Масло промышленное	ГОСТ 20799-88 Марки И-50А с изм. 1-5	1 Вязкость 2.Кислотное число 3 Содержание влаги	1 Вязкость кинематическая, мм <sup>2</sup> /с, при 40°С 2 Кислотное число, мг КОН на 1 г масла, не более 3 Зольность, %, не более 4 Массовая доля серы в маслах из сернистых нефтей, %, не более 5 Содержание механических примесей 6 Содержание воды 7 Плотность при 20°С, кг/м <sup>3</sup> , не более 8 Температура застывания, °С, не выше 9 Цвет на колориметре ЦНТ, единицы ЦНТ, не более 10 Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °С, не ниже 11 Стабильность против окисления: - приращение кислотного числа окисного масла, мг КОН на 1 г масла, не более - приращение смол, %, не более 12 Содержание растворителей в маслах селективной очистки	0,05  0,005 1,1 отсутствие следы  910 минус  15  4,5  225   0,4  3,0      отсутствие

Технологический принцип получения холода заключается в отъеме тепла от рассола испаряющимся аммиаком. Охлажденный рассол подается на

производство изопренового каучука. Далее нагретый рассол поступает в испаритель холодильного контура и цикл повторяется.

Получение холода основано на передаче тепла, отнимаемого от циркулирующего рассола испаряемому им аммиаку. Температура охлаждения зависит от давления испаряемого аммиака.

Описание технологической схемы дано в соответствии с постоянным технологическим регламентом производства изопрена цеха И-3-9 ООО «СИБУР Тольятти» [3].

Для получения холода минус 5 °С используются испарители № 208/1-3, а для получения холода 0 °С - испарители № 210/1-4 .

Жидкий аммиак из отделения Д-1а цеха Д-1-И-1-Д-1а под давлением нагнетания компрессора АВ-100 (~15 кгс/см<sup>2</sup>) поступает в ресивер № 206/1 (№ 206/2,3). Количество аммиака в ресивере № 206/1-3 контролируется по уровнемерному стеклу в ресиверах.

Из подключенного в рабочий замкнутый цикл ресивера № 206/1-3 жидкий аммиак с давлением нагнетания работающих компрессоров поступает через клапаны регуляторов уровня поз. 802, 8030 в отделители жидкости № 209, 207 соответственно.

Жидкий аммиак, проходя через клапаны регуляторов уровня поз. 802 и поз. 8030, дросселируется соответственно до давления 2,6 кгс/см<sup>2</sup> и 1,9 кгс/см<sup>2</sup>, что соответствует температуре кипения аммиака минус 5 °С и минус 10 °С.

Из отделителя жидкости № 209 жидкий аммиак поступает в межтрубное пространство испарителя № 210/1-4, где испаряется за счет тепла, циркулирующего по трубному пространству рассола, поступающего из отделений И-6 и И-9.

Из отделителя жидкости № 207 жидкий аммиак поступает в межтрубное пространство испарителя № 208/1-3, где испаряется за счет тепла циркулирующего по трубному пространству рассола, поступающего из отделений И-9, И-16, корпуса ИП-10А (столовой).

Давление испарения аммиака в испарителях регулируется количеством подаваемого на испарение аммиака и отбором паров на всас компрессоров № 201/1-3, 202, 203.

Из испарителей № 208 и 210 пары аммиака через отделители жидкости № 207 и 209, где за счет изменения направления потока, освобождаются от уносимых с испарителей капель жидкого аммиака, поступают в коллектор всаса компрессоров 4АГ № 201/1-3, 202, 203.

Для предотвращения попадания жидкого аммиака по линии всаса в цилиндры компрессоров, они снабжены системой автоматического отключения – блокировкой, которая срабатывает при увеличении уровня в отделителях жидкости № 207, 209 до 80 % по шкале прибора, при этом включается световая и звуковая сигнализация срабатывания блокировки.

Для улавливания механических примесей (окалины, ржавчины, грязи и т.п.) газообразный аммиак проходит через грязеуловители № 219/1-3, 220, 221, которые установлены на всасывающих линиях компрессоров.

В компрессорах № 201/1-3, 202, 203 пары аммиака сжимаются до давления не более 15,0 кгс/см<sup>2</sup>. От завьшения давления нагнетания компрессоры защищены системой блокировки поз. 5025, которая срабатывает при достижении давления в коллекторе нагнетания 15,0 кгс/см<sup>2</sup>, при этом отключается электродвигатель компрессора и автоматически разбирается электросхема на подстанции № 18, что сигнализируется срабатыванием световой и звуковой сигнализации.

При сжатии температура паров аммиака повышается до 125 °С.

Сжатый газообразный аммиак из линии нагнетания компрессоров № 201/1-3, 202, 203 поступает в акустические емкости № 204а/1-5, для уменьшения пульсаций давления.

Из акустических емкостей № 204а/1-5 аммиак поступает в общий коллектор нагнетания компрессоров и затем в маслоотделители № 204/1-2, в конденсаторы № 205/1-7,9,10, где охлаждаются и конденсируются за счет подачи оборотной водой в трубное пространство конденсаторов № 205.

Сконденсированный в конденсаторах № 205 жидкий аммиак сливается в рабочий (подключенный в оборотный цикл) ресивер № 206. На этом цикл замыкается.

Таблица 2 - Нормы технологического режима[3]

Наименование стадий процесса, аппараты, показатели режима	Единица измерения	Допускаемые пределы технологических параметров	Требуемый класс точности измерительных приборов
Температура рассола минус 5 °С	°С	не выше минус 2°С	1,5
Температура рассола 0 °С	°С	не выше плюс 3°С	1,5
Давление аммиака в линии нагнетания компрессоров № 201/1-3, 202, 203 марки 4АГ	МПа	не более 1,5	2,5
Уровень аммиака в аппарате № 209 (точка отсчёта от днища 900 мм)	мм	Не более 1540 что соответствует не более 80 % шкалы прибора	2,5

Аммиак (NH<sub>3</sub>) - относится к аварийно химически опасным веществам (АХОВ) и является токсичным, взрывоопасным и огнеопасным продуктом. По пожароопасности помещение машинного зала компрессоров относится к категории «Б», наружная установка холодильного отделения к категории «А».

Образование взрывоопасных концентраций возможно:

- на технологическом оборудовании при попадании в него воздуха;
- на территории отделения при пропусках продукта из оборудования и коммуникаций;
- в канализационных сетях при попадании продукта в канализацию.

Характерной особенностью отделения получения холода является наличие высоких давлений, электрического напряжения, низкой и высокой температуры.

Ввиду токсичности продуктов, существует опасность отравления работающих и загрязнения окружающей среды в случае разгерметизации оборудования, выброса газов или разливе продукта в результате нарушений правил эксплуатации, норм технологического режима, порядка проведения ремонтных работ.

Фактором, обуславливающим опасность разгерметизации оборудования, является наличие аппаратов, емкостей, насосов и трубопроводов, находящихся под давлением аммиака.

Для установки характерно также наличие большого количества запорной арматуры, фланцевых соединений на трубопроводах и аппаратах, находящихся под разным давлением, но связанных между собой технологически, что представляет собой опасность прорыва газа через неплотности соединений.

Система ПАЗ предназначена для снижения риска аварий технологических процессов путем перевода процесса/оборудования в безопасное состояние.

Системы ПАЗ должны обеспечивать защиту персонала, технологического оборудования и окружающей среды в случае возникновения на управляемом объекте нештатной ситуации, развитие которой может привести к аварии.

Таблица 3 - Перечень блокировок и сигнализации[3]

Наименование параметра	Номер позиции, предел измерения	Величина уставки в единицах измеряемого параметра		Величина уставки в единицах шкалы прибора				Перечень противоаварийных воздействий ПАЗ
		min	max	блокировка		сигнализац ия		
				min	max	min	max	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Уровень масла в емкости № 229/II	544 0÷800 мм	20 % 160 мм	-	-	-	0,36	-	Световая и звуковая сигнализация
Уровень в отделителе жидкости № 209	802 0÷800 мм	-	80 % 640 мм	-	0,84	-	0,84	Блокировка. Отключаются электродвигатели работающих компрессоров, сработает световая и звуковая сигнализация
Давление аммиака в коллекторе нагнетания компрессоров № 201/1-3, 202, 203	9125 0-25 кгс/см <sup>2</sup>	-	15,0 кгс/с м <sup>2</sup>	-	15,0 кгс/ см <sup>2</sup>	-	15,0 кгс/с м <sup>2</sup>	Блокировка. Отключаются электродвигатели работающих компрессоров, сработает световая и звуковая сигнализация



Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Загазован о в помещен ии машзала компресс оров 4АГ № 201/1- 3, 202, 203	Газоа нализ атор аммиа ка ДАХ 0÷600 мг/м <sup>3</sup> аммиа ка	-	20 мг/м 3 амми ака в возд ухе (5,6 мА)	-	20 мг/ м3 амм иак а в воз дух е (5,6 мА)	-	20 мг/м 3 амми ака в возд ухе (5,6 мА)	Включается светозвуковая сигнализация в помещении машинного зала компрессоров. Включается аварийнаявент система в компрессорно м отделении

В случае, когда один из параметров достигает величины, опасной для дальнейшей работы компрессора, компрессор будет аварийно отключен блокировкой.

Аварийная сигнализация и блокировка по параметрам, характеризующим работу компрессоров, выполнена на базе блока аварийной защиты и сигнализации БАЗИС-3 совместно с блоком внешнего табло БВТ-24В, расположенных на щите операторной (панель № 12).

### 1.3 Анализ работы существующей компрессорной установки

Для получения холода в цехе И 3-9 используются компрессорные холодильные установки. В Приложении А представлена схема существующего компрессора.

Основными элементами компрессионной холодильной установки, с помощью которых реализуется ее рабочий цикл, являются:

- компрессор - элемент холодильного цикла, обеспечивающий повышение давления хладагента и его циркуляцию в контуре холодильной машины;

- дросселирующее устройство (капиллярная трубка, терморегулирующий вентиль) служит регулирования количества хладагента, попадающего в испаритель в зависимости от перегрева на испарителе.

- испаритель (охладитель) – теплообменник, в котором происходит кипение хладагента (с поглощением тепла) и непосредственно сам процесс охлаждения;

- конденсатор– теплообменник, в котором в результате фазового перехода хладагента из газообразного состояния в жидкое, отведенная теплота сбрасывается в окружающую среду.

- ресивер–для создания запаса жидкого хладагента, фильтр- для улавливания механических загрязнений (ржавчины, песка и др.)

Аммиачный горизонтальный компрессор марки 4АГ представляет собой спаренный компрессор одноступенчатого сжатия двойного действия с приводом от синхронного электродвигателя и предназначен для холодильных установок промышленного назначения. Компрессор является двухлинейным с двумя параллельными цилиндрами [60]. Технические характеристики поршневого компрессора 4АГ приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Технические характеристики компрессора 4АГ

Основные параметры	Размерность	Техническ ие данные
Диаметр цилиндра	мм	450
Число цилиндров	шт.	2
Ход поршня	мм	550
Диаметр штока	мм	100
Число оборотов	об/мин	167
Теоретически описываемый объем	м <sup>3</sup> /час	3420
Холодопроизводительность при $t_0 = \text{минус } 10^{\circ}\text{C}$ $t_{\text{исп}} = \text{плюс } 15^{\circ}\text{C}$	ккал/час	1700000
	кВт	1977
Индикаторная мощность	л.с.	528
Мощность мотора (марка ДСКП-260-24/36)	Квс/кВт	740/625



Рисунок 1 – Поршневой компрессор 4АГ

Аммиачный горизонтальный компрессор состоит из 2-х одинаковых компрессоров – правой и левой модели, соединенных между собой двухколенным четырехпоршным валом, на утолщенную среднюю часть которого насаживается ротор синхронного электродвигателя (рисунок 1).

Основные узлы компрессора: рама, двухколенный вал, цилиндры, поршни со штоками и поршневыми кольцами, шатуны, крейцкопфы, сальники с металлической набивкой, всасывающие и нагнетательные клапаны, перепускной клапан, смазочный механизм, система смазки движения и цилиндров.

Для привода компрессора в движение применяется синхронный электромотор открытого исполнения без подшипников марки ДСКП-260-24/36. Ротор устанавливается непосредственно на коленчатом валу компрессора. Статор монтируется на общем с компрессором фундаменте.

Компрессор снабжен ручным поворотным механизмом, который действует на зубчатый венец ротора двигателя.

Для смазки применяются смазочные масла:

- для группы механизмов движения – индустриальное -50 (машинное СУ);

- для цилиндров и сальников смазочное масло ХА (Фригус).

Емкость предназначена для хранения индустриального масла марки И-50А.

Из емкостей индустриальное масло насосом подается на смазку механизма движения компрессоров.

После смазки механизма движения компрессоров, масло самотеком сливается в емкость [60].

Аммиачный горизонтальный конденсатор представляет собой кожухотрубчатый аппарат (рисунок 2).

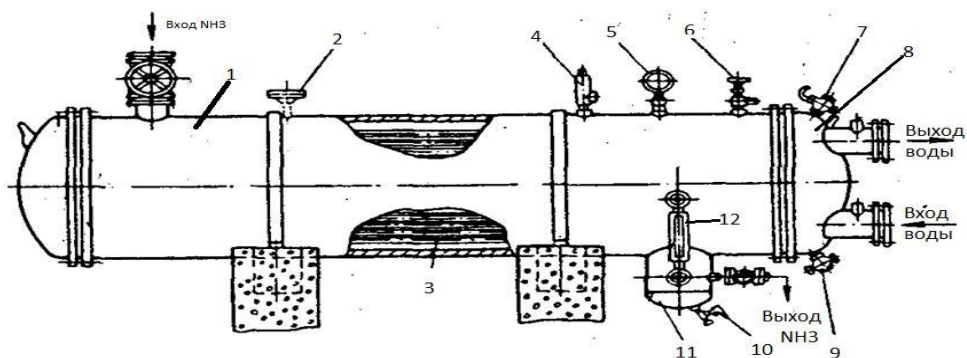


Рисунок 2 - Аммиачный горизонтальный конденсатор

Хладагент в парообразном виде подается в верхнюю часть аппарата, где конденсируется за счет рекуперативного теплообмена в трубках с охлаждающей оборотной водой. Межтрубное пространство разделено перегородками для увеличения интенсивности теплообмена.

Трубный пучок имеет U-образную форму. Это позволяет компенсировать тепловые расширения из-за большой разности температур контактирующих сред.

Скорость процесса передачи тепла при конденсации хладагента на поверхности охлаждаемых водой труб зависит от модели образования конденсата и скорости отвода сконденсировавшегося вещества от поверхности теплообмена. Если конденсат удаляется медленно, то

эффективность процесса снижается. Образование пленки на теплообменной поверхности увеличивает термическое сопротивление стенки и соответственно снижает общий коэффициент теплопередачи процесса, характеризующий его скорость.

Назначение испарителя – передача тепла от рассола к кипящему аммиаку. Жидкий аммиак предварительно проходит дроссель, где значительно снижается его давление. В межтрубное пространство он подается при параметрах кипения. Газообразный аммиак выходит из верхней части аппарата и попадают во всасывающий трубопровод компрессорного агрегата.

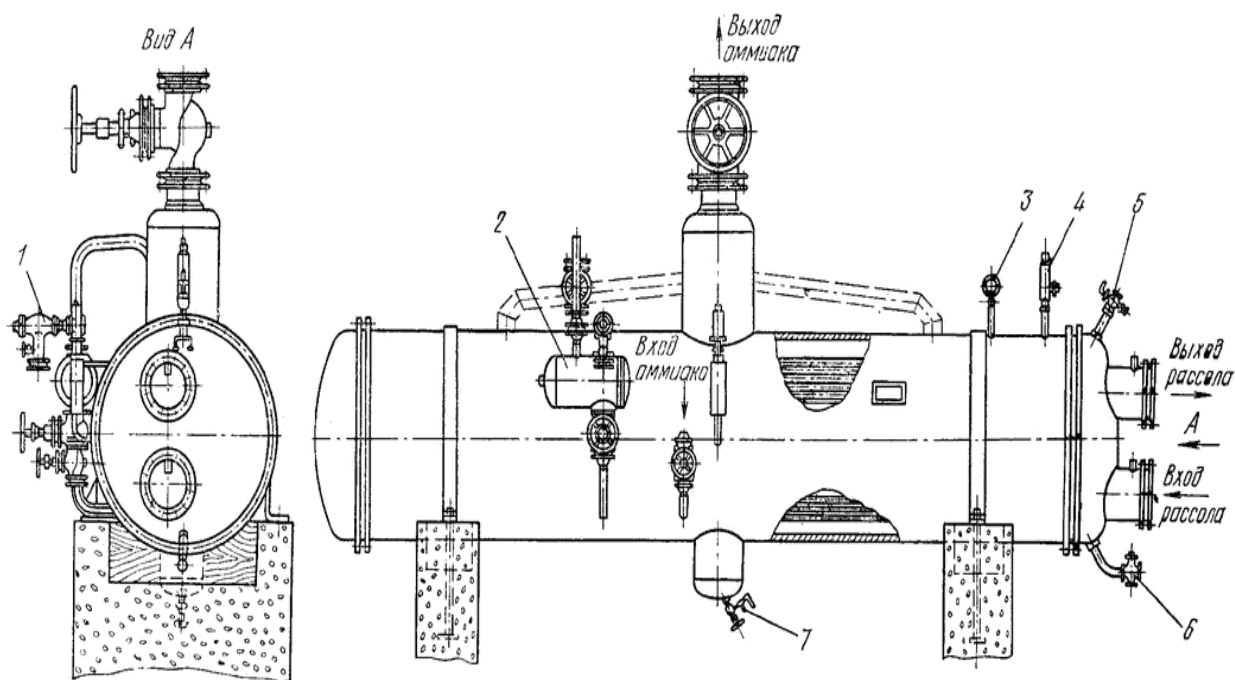


Рисунок 3 – Аммиачный горизонтальный испаритель

В испарителе, изображенном на рисунке 3, поддерживается уровень аммиака на уровне 80% в межтрубном пространстве. При этом несколько верхних рядов труб не погружены в жидкость. Эти трубы выполняют функцию пароперегревателя, то есть препятствуют попаданию жидкой фазы на всас компрессоров. Для этой же цели в верхней части аппарата смонтирован сухопарник. Для сбора масла и сброса загрязнений в нижней части испарителя выполнен маслоотстойник.

Смазка механизма движения компрессоров № 201/1-3, 202, 203 производится индустриальным маслом марки И-50А.

Масло, попадая с аммиаком в испарители № 210, 208 при низких температурах оседает на трубках испарителей, ухудшая теплообмен.

Аммиачный горизонтальный компрессор марки 4АГ эксплуатируемый в компрессорной установке имеет следующие недостатки:

- низкий КПД 0,65 – 0,7;
- высокое потребление электроэнергии;
- ухудшение теплообмена в испарителях, что свидетельствует о замасливание трубного пучка в этих аппаратах. Возникает необходимость прогрева аппаратов и освобождения их от масла [60];
- физический износ.

## 2 Обоснование технического решения

Для холодильных установок чрезвычайно важным элементом является компрессор.

В зависимости от способа сжатия хладонов, в холодильном оборудовании применяют поршневые компрессоры, а также спиральные, винтовые, ротационные и центробежные компрессоры. На сегодня самими часто используемыми элементами холодильных установок были и остаются проверенные временем поршневые и винтовые компрессоры.

В сравнении с компрессорами поршневыми, компрессоры винтовые обладают заметными преимуществами:

- имеют низкий уровень шума и вибрации;
- отличаются малыми габаритами, весом и могут монтироваться непосредственно в рабочих помещениях;
- не требуют специального фундамента;
- минимально расходуют масло ( $2-3 \text{ мг/м}^3$ ), в отличие от крупных поршневых компрессоров работают с лубрикаторной смазкой, что позволяет вырабатывать более чистый воздух и как следствие использовать их для питания самого современного пневматического оборудования;
- оборудованы автоматической системой управления и контроля работоспособности агрегатов, не нуждаются в наблюдении рабочего персонала, отличаются высокой надежностью, а также способны на длительную бесперебойную работу без обслуживания;
- оснащены воздушным охлаждением, которое дает возможность не использовать системы оборотного водоснабжения. Более того, можно вторично использовать выделяемое в результате работы винтовых компрессоров тепло (например, для обогрева помещений);
- не нуждаются в персонале для их обслуживания;
- потребляют меньше электроэнергии, а, следовательно, экономичны;

- имеют значительно больший (в 2-3 раза) ресурс работы по сравнению с компрессорами поршневыми.

Главное достоинство винтовых компрессоров - это их экономичность: исследования компрессорного оборудования показывают, что в рабочем режиме в среднем используется только 50-80% мощности компрессора. Для примера в таблице 5 приведены основные показатели двух типов воздушных компрессоров

Таблица 5 - Сравнительный анализ поршневых и винтовых компрессоров

Характеристики сравнения	Поршневой тип	Винтовой тип
Температура воздуха на выходе, °С	20 – 80	+8-13 к окружающей
Шум, уровень, дБ(А)	80 - 95	65 - 70
Расчетные данные по наработке на отказ, час.	3000 - 6000	30000 - 40000
Очистка воздуха	нет	есть
Подача воздушной среды	50/50	24 часа в сутки
Содержание масла, мг/м <sup>3</sup>	10 - 15	2 - 3
Эффективность при всасывании на выходе, %	50 - 70	95 - 99
Затрачиваемая мощность на 1 объем сжатого воздуха, %	100	75

Проанализировав технические характеристики двух компрессоров, поршневого и винтового делаем вывод что винтовые компрессора превосходят поршневые по всем характеристикам.

Исходя из сравнения характеристик поршневых и винтовых компрессоров видно, что винтовой тип компрессора более выгоден с экономической точки зрения, более надежен, выгоднее в обслуживании в сравнении с поршневым. С точки зрения потребителей винтовые компрессорные машины считаются более экономичными, несмотря на ту



особенность, что при покупке они демонстрируют более высокую цену в сравнении с поршневыми.

На российском рынке компрессоров сформировалась импортоориентированная модель, большая часть рынка составляет продукция зарубежных производителей. В структуре рынка компрессоров в 2018 году объем импортных поставок превышал внутреннее производство в 338,2 раз.

Компания GEA в России организовала собственное производство в г.Климовск Московской области, где производится сборка холодильных машин, дожимных компрессорных станций, а также другого оборудования концерна.

Преимущества винтовых компрессоров GEA Grasso:

- максимально возможная энергоэффективность;
- высокая надежность;
- продолжительный срок службы;
- низкие эксплуатационные затраты;
- широкий спектр винтовых компрессорных агрегатов.

Технические характеристики:

- бесступенчатое регулирование холодопроизводительности с помощью преобразователя частоты и регулятора мощности;
- прочная несущая рама продлевает срок службы подшипников электродвигателя;
- низкорасположенный центр тяжести способствует снижению уровня вибраций;
- низкие потери масла (5 ppm) обусловлены использованием трехступенчатого маслоотделителя с регулируемыми размерами и небольшим количеством масла в системе;
- эффективный маслоохладитель с возможностью повторного использования вторичного тепла;
- надежное функционирование благодаря системе управления GEA Omni [8].

Все компрессоры GEA Grasso имеют соответствующие сертификаты РФ и допуск к применению во взрывоопасных зонах[57 с.8].

Винтовые компрессоры представляют собой двухвальные рабочие машины с вращающимся ротором, которые работают по принципу вытеснения и приводятся в действие впрыском масла. Винтовые компрессоры работают с холодильным агентом (стандартный агент: аммиак  $\text{NH}_3$ ).

Стандартный винтовой компрессорный агрегат представлен на рисунке 5[8 с.43]. Наименование основных узлов приведено в таблице 6.

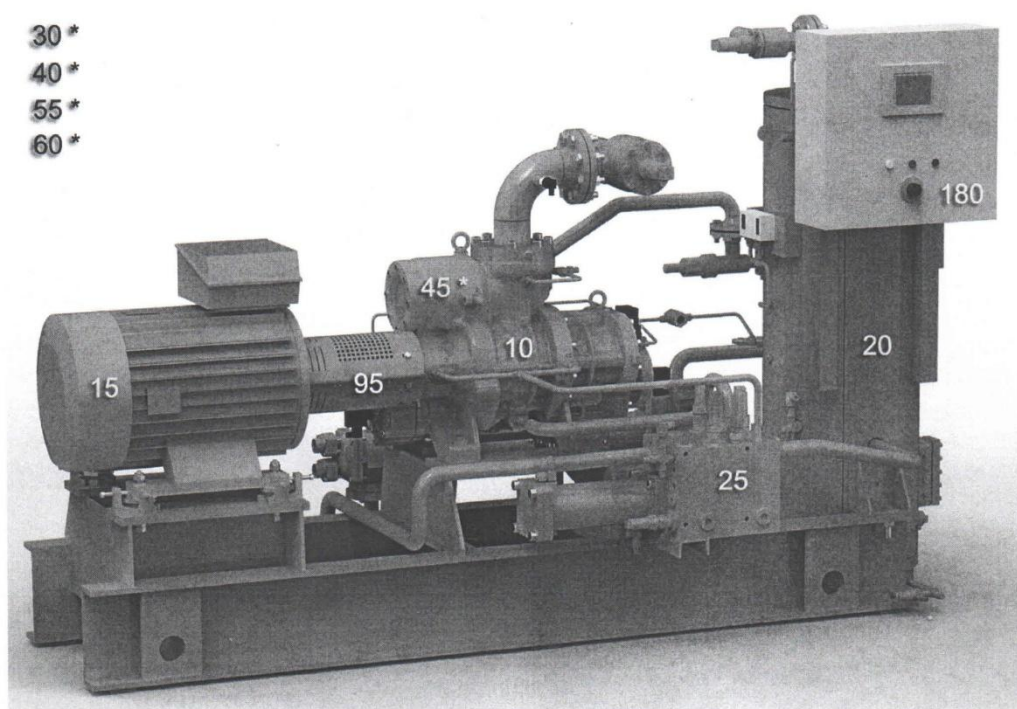


Рисунок 5 – Винтовой компрессор серии Grasso

Таблица 6 – Детали компрессора

Номер	Детали компрессора
010	Винтовой компрессор
015	Приводной двигатель компрессора
020	Маслоотделитель
025	ОМС-блок (возможно размещение в качестве отдельного масляного фильтра при значительном количестве масла)
030	Маслоохладитель (* не виден на рисунке)
040	Маслонасос (* интегрирован в компрессор, возможно размещение в качестве внешнего маслонасоса при значительном количестве масла)
045	Всасывающий фильтр
055	Обратный клапан – сторона всасывания (* установлен в компрессоре)
060	Обратный клапан — сторона нагнетания (* до DN 150, в зависимости от условий эксплуатации и холодильного агента, встраивается в маслоотделитель или устанавливается в напорную магистраль после маслоохладителя)
095	Муфта

Компрессор приводится в движение с помощью 2-полюсного электродвигателя IP23 с воздушным охлаждением и рабочим напряжением 400 В; 50 Гц посредством муфты.

Муфта предназначена для передачи крутящего момента между компрессором и приводным двигателем компрессора. Эластичное исполнение муфты защищает разьединение от таких вредных воздействий, как осевые или радиальные силы, колебания или осевое смещение. Колебания и скачки числа оборотов демпфируются и амортизируются, вращательные колебания сокращаются.

Электрические маслоподогреватели встроены в маслоотделитель, чтобы во время простоя винтового компрессорного агрегата подогревать смесь масла и холодильного агента в маслоотделителе. Маслоподогреватель препятствует образованию конденсации холодильного агента в масле и вспениванию масла во время запуска.

Оснащение маслоподогревателей:

- регулятор температуры для регулировки постоянной температуры масла в маслоотделителе (настройки от 20 до 150 °С;

- термостат на случай неисправности, например, работа всухую.

Маслоохладитель предназначен для охлаждения подогретого в компрессоре масла до такой температуры, чтобы обеспечить снабжение компрессора маслом достаточной вязкости[58 с.32].

GSC TP имеет в составе: контроллер с блоком управления и индикации, сигнальные лампочки «Работа», «Предупреждение» и «Неисправность», кнопочный выключатель аварийного останова, элементы связи и корпус.

Устройство GSC TP в стандартном исполнении реализует следующий объем функций:

- индикация всех важных физических и технических параметров, например, давление, температура, ток двигателя, мощность, количество рабочих часов, режим работы и сообщения о состоянии;

- автоматический запуск и отключение винтового компрессорного агрегата, а также регулировка мощности в зависимости от давления всасывания или внешней температуры;

- контроль всех рабочих параметров;

- ограничение мощности компрессора, если измеренное давление нагнетания, давление всасывания, температура холодильного агента или ток двигателя имеют перегрузку;

- память неисправностей с указанием даты и времени;

- распознавание обрыва проводов всех аналоговых входных сигналов;

- защита паролем для предотвращения несанкционированного доступа к важным параметрам;

- энергонезависимое сохранение программы;

- возможность коммутации с системой управления через MPI (в качестве опции - по шинам Profibus-DP, Modbus RTU или Modbus TCP) [8].

Следующие рабочие параметры можно постоянно контролировать на дисплее устройства управления компрессором:

- давление всасывания;
- конечное давление сжатия;
- давление масла;
- контроль системы масла;
- температура всасывания;
- конечная температура сжатия;
- температура масла;
- ток двигателя;
- температура насыщения давления всасывания;
- температура насыщения давления конденсации;
- количество рабочих часов;
- разность между давлением масла и конечным давлением сжатия (контроль системы масла).

Винтовой компрессор засасывает пар холодильного агента через обратный клапан на стороне всасывания и фильтр всасывания и нагнетает сжатый пар через маслоотделитель и обратный клапан на стороне давления в конденсатор. Обратный клапан на стороне всасывания препятствует внезапному выравниванию давления со стороной низкого давления холодильной установки и одновременно обратному вращению винтового компрессора. Обратный клапан на стороне нагнетания предотвращает обратную конденсацию холодильного агента в маслоотделителе

Всасывающий фильтр предотвращает попадание в компрессор захваченных всасывающим потоком частиц загрязнений. Фильтрующий элемент отличается большой площадью фильтрации. Тонкость фильтрации составляет макс. 140 мкм. Колебания газа, которые могут возникнуть в камере нагнетания компрессоров в условиях высокого давления при нулевой подаче, предотвращаются при помощи защиты от газовых пульсаций. Это устройство состоит из уравнивающего трубопровода между маслоотделителем и рабочим объемом компрессора.

Винтовые компрессоры работают по принципу затопления маслом. Во время процесса сжатия к компрессору подается масло для холодильных машин для смазки, уплотнения, уменьшения шума и отдачи части тепла сжатия. После окончания процесса сжатия масло отделяется в маслоотделителе от хладагента[59 с.4].

Винтовые компрессоры оборудованы устройством плавного регулирования производительности в диапазоне 10-100%. Регулирование производительности осуществляется уменьшением длины хода в винтовом компрессоре. Длина ротора, определяющая процесс сжатия, изменяется гидравлически управляемыми регулируемыми салазками. Положение регулирующих салазок регистрируется датчиком положения (датчиком пути). На устройстве управления подается сигнал о достижении конечного положения регулирующих салазок МИН или МАКС, а на дисплее может отображаться относительное положение регулирующих салазок в процентах.

Гидравлическое перемещение регулирующих салазок управляется четырьмя электромагнитными клапанами, смонтированными в одном блоке. Скорости перемещения регулирующих салазок в направлениях МИН и МАКС в условиях эксплуатации должны быть по возможности одинаковыми для обеспечения лучших регулировочных характеристик.

Винтовые компрессоры GEA Grasso выпускаются серий SP1, SP2, SPduo. Их характеристики приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Технические характеристики винтовых компрессоры GEA Grasso разных серий [53]

Основные параметры	Серия SP1	Серия SP2	Серия SPduo
Количество ступеней	одна	две	два параллельно работающих компрессора
Мощность, кВт	192 - 5708	386 - 3176	95 - 1770
Регулирование холодопроизводительности	бесступенчатое	ступенчатое	ступенчатое
Несущая рама	общая	общая	общая
Система управления	GEA Omni	GEA Omni	GEA Omni
Интеграция компонентов	внутри компрессора	частичная интеграция	частичная интеграция
Маслосистема	интегрированная	встроенная	встроенная
Способ регулирования степени сжатия и производительности	с помощью сдвоенной системы	с помощью сдвоенной системы	с помощью сдвоенной системы
Конструкция	компактная	компактная	компактная

Исходя из заданной производительности более 1977 кВт с учетом возможности увеличения холодопроизводительности и меньших размеров принимаем винтовой компрессор серии SP1 модель XCB-2A.

Серия GEA Grasso SP1 включает 16 типоразмеров одноступенчатых винтовых агрегатов мощностью от 192 до 5708 кВт (R717,  $-10/+35^{\circ}\text{C}$ ). Модели меньших размеров характеризуются большим уровнем интеграции компонентов, поэтому обладают меньшим количеством соединительных элементов. Агрегаты большой мощности монтируются на отдельной несущей раме, что снижает уровень шумов и вибраций во время работы [60 с. 12].

Сравнительный анализ поршневых компрессоров 4АГ и XCB-2A Grasso серия SP1 представлен в таблице 8.

Таблица 8 - Сравнительный анализ компрессоров 4АГ и ХСВ-2А Grasso

Основные параметры	Единица измерения	4АГ	ХСВ-2А Grasso серия SP1
Хладагент		аммиак	аммиак
Теоретический объем всасывания	м <sup>3</sup> /час	3420	4900
Холодопроизводительность	кВт	1977	3845
Номинальная мощность привода	кВт	625	967
Скорость вращения вала	об/мин	167	2940
Температура кипения хладагента	°С	минус 10	минус 5
Температура конденсации хладагента	°С	25	38

Схема предлагаемого компрессора представлена в Приложении Б.

Ожидаемый эффект от внедрения винтового компрессора:

- дельный расход потребляемой мощности к тепловой кВт/кВт:  
компрессор 4АГ - 0,316;  
компрессор ХСВ-2А Grasso серия SP1 - 0,197;
- производительность компрессора увеличивается в 1,94 раза;
- расход электроэнергии уменьшается в 1,6 раза;
- улучшается теплообмен в испарителях, так как уменьшается замасливание трубного пучка в этих аппаратах;
- потери масла снижаются с 25 мг/м<sup>3</sup> до 5 мг/м<sup>3</sup>. Необходимость прогрева аппаратов и освобождения их от масла практически отпадает;
- снижается уровень шума с 80- 95 до 65 -70 дБ;
- расчетная наработка на отказ увеличивается в 10 раз.



### 3. Тепловой расчет компрессорной установки

#### 3.1 Определение температурного режима

Так как холодопроизводительность установки увеличивается почти в 2 раза необходимо выполнить тепловой расчет и выбрать теплообменное оборудование.

Расчет компрессорной установки заключается в определении температурного режима, подбора аммиачного конденсатора и аммиачного испарителя [63 с.4].

Принимаем температуру воды на входе в конденсатор  $25^{\circ}\text{C}$  или  $T_{w1} = 298\text{K}$   
Температура воды на выходе из конденсатора

$$T_{w2} = T_{w1} + \Delta T_w, \quad (1)$$

где  $\Delta T$  – ширина зоны охлаждения циркуляционной воды в зависимости от типа градирни составляет 2 - 5К. Принимаем  $\Delta T_w = 3\text{K}$  (63).

$$T_{w2} = 298 + 3 = 301\text{K}$$

Средняя температура охлаждающей воды в конденсаторе

$$T_{wcp} = (T_1 + T_2)/2, \quad (2)$$

$$T_{wcp} = (298 + 301)/2 = 299,5\text{K}$$

Для аммиачных компрессоров по рекомендациям [40] средний температурный напор  $\theta$  составляет 4...7 К. Принимаем  $\theta = 5,5\text{K}$ .

Температура конденсации

$$T_k = T_{wcp} + \theta, \quad (3)$$

$$T_k = 299,5 + 5,5 = 305\text{K} (32^{\circ}\text{C})$$

Определяем температуру кипения. Величина подохлажденияхладоносителя составляет 2...4К. Принимаем  $\Delta T_s = 2\text{K}$ .

Температура хладоносителя на входе в испаритель

$$T_{s1} = T_{s2} + \Delta T_s, \quad (4)$$

$$T_{s1} = 242 + 2 = 244\text{K}$$

Средняя температура хладоносителя

$$T_{scp} = (T_{s1} + T_{s2})/2, \quad (5)$$

$$T_{scp} = (242 + 244)/2 = 243\text{K} (30^{\circ}\text{C})$$

Температурный напор по рекомендациям [40] для аммиачных кожухотрубчатых испарителей составляет 4...7 К. Принимаем  $\theta = 6\text{К}$ .

Температура кипения

$$T_0 = T_{\text{ср}} - \theta, \quad (6)$$

$$T_0 = 243 - 6 = 237\text{К} (-36^\circ\text{C})$$

### 3.2 Подбор и расчет кожухотрубчатого конденсатора

Исходные данные:

Тепловая нагрузка на конденсатор  $Q_k = 3845\text{кВт}$

Температура конденсации  $T_k = 305\text{К}$

Температура воды на входе в конденсатор  $T_{w1} = 298\text{К}$

Температура воды на выходе из конденсатора  $T_{w2} = 301\text{К}$

Средняя логарифмическая разность температур

$$\Delta T_{\text{ср}} = \frac{\Delta T_6 - \Delta T_M}{2,31 \lg \frac{\Delta T_6}{\Delta T_M}}, \quad (7)$$

$$\Delta T_{\text{ср}} = \frac{301 - 298}{2,31 \lg \frac{305 - 298}{305 - 301}} = 5,4\text{К}$$

Задаемся величиной удельной тепловой нагрузки из условия длительной эксплуатации конденсатора  $q_{Fn} = 3500\text{Вт/м}^2$  (по рекомендациям [63]  $q_{Fn}$  составляет 3500 – 5700 Вт/м<sup>2</sup> при  $\Delta T_{\text{ср}} = 4\text{-}7\text{К}$ ).

Теплообменная наружная поверхность конденсатора

$$F_{\text{max}} = \frac{Q_k}{q_{Fn}}, \quad (8)$$

$$F_{\text{max}} = \frac{3845000}{3500} = 1098\text{м}^2$$

Выбираем три конденсатора марки КТГ-400 (таблица П2 [63])

Основные данные:

поверхность теплообмена  $F, \text{м}^2$  - 400

число труб  $n$  - 870

диаметр труб $d$ , мм	- 25
длина труб $l$ , м	- 5
число ходов $z$	- 8

Выполним проверочный расчет горизонтального кожухотрубчатого конденсатора КТГ-400.

Определим расход охлаждающей воды

$$m = \frac{Q_k}{c(t_k - t_n)}, \quad (9)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость  $\frac{\text{кДж}}{\text{кгК}} c = 4190 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$  (табл. XXVII[51]).

$$m = \frac{3845000}{4190(301 - 298)} = 306 \text{ кг/с}$$

Теплофизические свойства воды при средней температуре  $T_{\text{ср}} = 299,5\text{К}$

$\mu_w$  – динамическая вязкость,  $\text{Па}\cdot\text{с}$   $\mu_w = 872,4 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$  (табл. XXVII [51]);

критерий Прандтля  $Pr = 5,98$  (табл. XXVII [51]);

$\rho$  – плотность,  $\text{кг/м}^3$   $\rho = 996,5 \text{ кг/м}^3$  (табл. XXVII[51]);

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт/м}^2\text{К}$   $\lambda = 61,1 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}^2\text{К}$  (табл. XXVII [51]).

Скорость движения воды внутри труб

$$\omega_k = \frac{4 \cdot m \cdot z}{\rho \cdot S \cdot n_{\text{тр}} \cdot n}, \quad (10)$$

где  $n$  – число конденсаторов,  $n = 3$ .

$$\omega_k = \frac{4 \cdot 306 \cdot 8}{996,5 \cdot 3,14 \cdot 0,02^2 \cdot 870 \cdot 3} = 3 \text{ м/с}$$

Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega d \rho}{\mu}, \quad (11)$$

$$Re = \frac{3 \cdot 0,02 \cdot 996,5}{872,4 \cdot 10^{-6}} = 68535$$

Так как  $Re > 10000$ , то режим движения в трубах турбулентный.

Критерий Нуссельта для трубного пространства

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}, \quad (12)$$

$$Nu = 0,021 * 68535^{0,8} * 5,98^{0,43} = 333,7$$

Коэффициент теплоотдачи для теплоносителя в трубном пространстве,

$$\frac{Вт}{м^2К}$$

$$\alpha_w = \frac{Nu\lambda}{d}, \quad (13)$$

$$\alpha_w = \frac{333,7 * 0,611}{0,02} = 10194 \frac{Вт}{м^2К}$$

Коэффициент теплоотдачи со стороны конденсирующегося аммиака

$$\alpha_a = 0,72 \sqrt[4]{\frac{g * r * \rho^2 * \lambda^3}{\mu * \Delta T_{ср} * d}}, \quad (14)$$

где теплофизические свойства аммиака при средней температуре [63]

$$T_k = 305К;$$

$$\mu - \text{динамическая вязкость, Па*с } \mu = 1,298 * 10^{-4} \text{ Па*с};$$

$$\rho - \text{плотность, кг/м}^3 \quad \rho = 592 \text{ кг/м}^3;$$

$$\lambda - \text{коэффициент теплопроводности, Вт/м}^2К \quad \lambda = 45,1 * 10^{-2} \text{ Вт/м}^2К;$$

$$r - \text{теплота парообразования, Дж/кг, } r = 1150000 \text{ Дж/кг.}$$

$$\alpha_a = 0,72 \sqrt[4]{\frac{9,81 * 1150000 * 592^2 * 0,451^3}{1,298 * 10^{-4} * 5,4 * 0,025}} = 2608 \frac{Вт}{м^2К}$$

Коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \Sigma R_{ст} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (15)$$

где  $R_{ст}$  – сопротивление теплопередаче загрязненной стенки,  $м^2К/Вт$  (табл. XXXI [51];

$$\lambda - \text{коэффициент теплопроводности стенки, } \frac{Вт}{мК} \lambda = 46,5 \frac{Вт}{мК} \text{ (табл. XXVIII}$$

(51));

$\delta$  – толщина стенки, м.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{2608} + \frac{1}{2900} + \frac{1}{5800} + \frac{0,002}{46,5} + \frac{1}{10194}} = 1060,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$$

Поверхностная плотность теплового потока

$$q = K\Delta T_{\text{ср}}, \quad (16)$$

$$q = 1060,6 * 5,4 = 5727 \text{ Вт/м}^2,$$

Расчетная площадь поверхности конденсатора

$$F_p = \frac{Q}{q}, \quad (17)$$

$$F_p = \frac{3845000}{5727} = 671 \text{ м}^2$$

Поскольку суммарная расчетная поверхность конденсаторов (741 м<sup>2</sup>) меньше фактической наружной поверхности трех конденсаторов КТГ-400 (1200 м<sup>2</sup>), то выбранные конденсаторы удовлетворяют условиям теплообмена.

Окончательно принимаем два конденсатора КТГ-400 общей площадью поверхности теплообмена 800 м<sup>2</sup>.

Запас площади поверхности теплообмена

$$\Delta = \frac{F - F_p}{F_p} 100\% \quad , \quad (18)$$

$$\Delta = \frac{800 - 671}{671} 100\% = 19,2\%$$

Таблица 9 – Краткая характеристика конденсаторов

Наименование оборудования или технических устройств	Количество	Техническая характеристика
Конденсатор аммиачный КТГ-400	3	Поверхность теплообмена - 400 м <sup>2</sup> Диаметр аппарата - 1200 мм Длина аппарата - 6800 мм Число трубок - 870 шт. Диаметр трубок - 25x2,5 мм Расчетная температура: межтрубного пространства - 150 °С трубного пространства - 27 °С Расчетное давление: в межтрубном пространстве - 18 кгс/см <sup>2</sup> в трубном пространстве - 4 кгс/см <sup>2</sup>

Внешний вид конденсатора представлен на рисунке 6



Рисунок 6 – Аммиачный конденсатор КТГ

### 3.3 Подбор и расчет испарителя

Произведем расчет испарителя, общий вид которого представлен на рисунке

7.



Рисунок 7 – Аммиачный конденсатор КТГ

Исходные данные:

Тепловая нагрузка на испаритель с учетом цикла работы компрессора  $Q_{и} = 3845 \cdot 0,6 = 2307 \text{ кВт}$ .

Температура кипения  $T_0 = 237 \text{ К}$ .

Температура рассола на входе в испаритель  $T_1 = 290 \text{ К}$ .

Температура рассола на выходе из испарителя  $T_2 = 288 \text{ К}$ .

Средняя логарифмическая разность температур

$$\Delta T_{cp} = \frac{\Delta T_6 - \Delta T_M}{2,31 \lg \frac{\Delta T_6}{\Delta T_M}}, \quad (19)$$

$$\Delta T_{cp} = \frac{290 - 288}{2,31 \lg \frac{290 - 237}{288 - 237}} = 5,9 \text{ К}$$

Задаемся величиной удельной тепловой нагрузки из условия длительной эксплуатации конденсатора  $q_{Fn} = 900 \text{ Вт/м}^2$  (по рекомендациям [63]  $q_{Fn}$ )

Теплообменная наружная поверхность конденсатора

$$F_{max} = \frac{Q_K}{q_{Fn}}, \quad (20)$$

$$F_{\max} = \frac{2307000}{900} = 2563 \text{ м}^2$$

Выбираем шесть испарителей марки ИТГ-400 (таблица П15[63])

Основные данные:

поверхность теплообмена  $F$ ,  $\text{м}^2$  - 400

число труб  $n$  - 870

диаметр труб  $d$ , мм - 25

длина труб  $l$ , м - 6

число ходов  $z$  - 4

Выполним проверочный расчет горизонтального кожухотрубчатого испарителя ИТГ-400.

Определим расход рассола сконцентрация хлористого кальция составляет 19,9÷29,4 % вес.

$$m = \frac{Q_{\text{и}}}{c(t_{\text{к}} - t_{\text{н}})}, \quad (21)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость  $\frac{\text{кДж}}{\text{кгК}} c = 2849 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$  (рис. XXI[51]).

$$m = \frac{2307000}{2849(290 - 288)} = 405 \text{ кг/с}$$

Теплофизические свойства рассола при средней температуре

$T_{\text{вср}} = 275,5 \text{ К}$ ;

$\mu_{\text{w}}$  – динамическая вязкость,  $\text{Па}\cdot\text{с}$   $\mu_{\text{w}} = 4,47 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$  (табл. IX [51]);

критерий Прандтля  $Pr = 5,22$  (рис. XIII [51]);

$\rho$  – плотность,  $\text{кг/м}^3$   $\rho = 1239 \text{ кг/м}^3$  (табл. IV[51]);

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт/м}^2\text{К}$   $\lambda = 0,5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  (рис. X [51]).

Скорость движения воды внутри труб

$$\omega_s = \frac{4 \cdot m \cdot z}{\rho \cdot S \cdot n_{\text{тр}} \cdot n}, \quad (22)$$

где  $n$  - число испарителей,  $n = 6$ .

$$\omega_s = \frac{4 \cdot 405 \cdot 4}{1239 \cdot 3,14 \cdot 0,02^2 \cdot 870 \cdot 6} = 0,8 \text{ м/с}$$



Скорость движения хладоносителя находится в допустимых пределах ( $\omega_s = 0,5-2$  м/с)

Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega d \rho}{\mu}, (23)$$

$$Re = \frac{0,8 * 0,02 * 1239}{4,47 * 10^{-3}} = 4435$$

Так как  $Re = 2300 - 10000$ , то режим движения в трубах переходный.

Критерий Нуссельта для трубного пространства

$$Nu = 0,008 Re^{0,9} Pr^{0,43}, (24)$$

$$Nu = 0,008 * 4435^{0,9} * 5,22^{0,43} = 31,1$$

Коэффициент теплоотдачи для теплоносителя в трубном пространстве ,

$\frac{Вт}{м^2К}$

$$\alpha_w = \frac{Nu \lambda}{d}, (25)$$

$$\alpha_w = \frac{31,1 * 0,5}{0,02} = 777,5 \frac{Вт}{м^2К}$$

Коэффициент теплоотдачи при кипении аммиака на пучке труб

$$\alpha_a = 580 * \Delta T_{cp}^{0,667}, (26)$$

$$\alpha_a = 580 * 5,9^{0,667} = 1827 \frac{Вт}{м^2К}$$

Коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + \Sigma R_{ст} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_a}}, (27)$$

где  $R_{ст}$  – сопротивление теплопередаче загрязненной стенки,  $м^2К/Вт$  (табл. XXXI [51];

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности стенки,  $\frac{Вт}{мК} \lambda = 46,5 \frac{Вт}{мК}$  (табл. XXVIII

[51]);

$\delta$  – толщина стенки, м.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \Sigma R_{CT} + \frac{\delta}{\lambda_{CT}} + \frac{1}{\alpha_2}}, (29)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{777,5} + \frac{1}{2900} + \frac{1}{5800} + \frac{0,002}{46,5} + \frac{1}{1827}} = 417,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$$

Поверхностная плотность теплового потока

$$q_F = K \Delta T_{cp}, (30)$$

$$q_F = 417,9 * 5,9 = 2466 \text{ Вт/м}^2$$

Тепловой поток, отнесенный к наружной поверхности

$$q_{FH} = q_F * d_{вн.} / d_n, (31)$$

$$q_{FH} = 2466 * 0,02 / 0,025 = 1973 \text{ Вт/м}^2$$

Расчетная площадь поверхности испарителя

$$F_p = \frac{Q}{q}, (32)$$

$$F_p = \frac{2307000}{1973} = 1169 \text{ м}^2$$

Поскольку суммарная расчетная поверхность испарителей (2563 м<sup>2</sup>) меньше фактической наружной поверхности шести испарителей ИТГ-400 (2400 м<sup>2</sup>), то выбранные испарители удовлетворяют условиям теплообмена и могут быть приняты для данной компрессорной установки.

Окончательно принимаем четыре испарителя ИТГ-400 общей площадью поверхности теплообмена 1600 м<sup>2</sup>.

Запас площади поверхности теплообмена

$$\Delta = \frac{F - F_p}{F_p} 100\% , (33)$$

$$\Delta = \frac{1600 - 1169}{1169} 100\% = 36,8\%$$

Основные параметры испарителя представлены в таблице 9

Таблица 10 – Краткая характеристика испарителей

Наименование оборудования или технических устройств	Количество	Техническая характеристика
Испаритель ИТГ-400	4	Поверхность охлаждения - 400 м <sup>2</sup> Диаметр аппарата - 1200 мм Длина аппарата - 6890 мм Количество трубок - 870 шт. Диаметр трубок - 25x2,5 мм Длина трубок - 6000 мм Расчетная температура: в трубном пространстве - 38÷70 °С в межтрубном пространстве - 90 °С Расчетное давление: в трубном пространстве - 20 кгс/см <sup>2</sup> в межтрубном пространстве - 20 кгс/см <sup>2</sup>

#### 4 Расчет эффективности модернизации установки И 3-9

Проведем расчет экономии энергопотребления и экономического эффекта.

Для расчёта экономического эффекта от внедрения мероприятия сравниваем удельные расходные нормы расхода электроэнергии на выработку изопрена за базовый и проектный периоды.

За базу берём расходные нормы по электроэнергии на выработку до реализации проекта.

Норма расхода электроэнергии достигнутая для установки получения холода на 1 тонну изопрена - 416,0 кВт/т.

За проект берём расходные нормы по электроэнергии на выработку изопрена после реализации проекта.

Мониторинг эффекта по данному проекту основывается на экономии электроэнергии на выработку изопрена за счет модернизации компрессорной установки.

Алгоритм расчета экономического эффекта определяется следующей формулой:

$$(УНР_{\text{баз}} - УНР_{\text{проект}}) \times V_{\text{проект}} \times Ц_{\text{ресурс}} \quad (34)$$

где  $УНР_{\text{баз}}$  – фактический расход электроэнергии базового периода на выработку изопрена, кВт/т.

$УНР_{\text{проект}}$  – фактический расход электроэнергии в проектного периода на выработку изопрена, кВт/т.

$V_{\text{проект}}$  – выпуск (объем производства) изопрена за прогнозируемый/отчетный период, т/период.

$Ц_{\text{ресурса}}$  – цена (ресурса) электроэнергии, руб./кВт.

Информация по удельным расходным нормам до- и после- проекта берется из динамики расходных норм указано в таблице 5. Составляется ежемесячно техниками по учету расхода сырья и энергоресурсов. Техники производства определяют фактическое потребление энергоресурсов на

основании приборов учета, установленных на производстве. Ответственный за предоставление данных начальник производства и начальник планово-экономического отдела.

После реализации проекта будут внесены изменения в нормы удельного расхода электроэнергии. Они описаны в таблице 11.

Таблица 11 - Удельные нормы до и после реализации проекта

Технологические предпосылки	Ед.изм.	Величина	Источник информации, пояснения
Стоимость электроэнергии	руб/кВт	2,99	УФСД 2018 (БП) Данные ПЭО
Стоимость электроэнергии	руб/кВт	3,11	УФСД 2019 (БП) Данные ПЭО
Объем производства изопрен	т/год	76 674,0	
ДО модернизации			
УНР по электроэнергии на производство изопрена	кВт/т	416,0	Фактические данные, "УНР ИЗОПРЕН, 2018"
ПОСЛЕ модернизации			
УНР по электроэнергии на производство изопрена	кВт/т	353,6	Расчет
Экономический эффект	тыс.руб./год	16047,2	Расчет

Годовое энергопотребление процесса получения изопрена до- и после-реализации проекта указано в таблице 12. Данные составлены на основе фактического потребления энергоресурсов на основании приборов учета, установленных на производстве.

Ответственный за предоставление данных начальник производства и начальник планово-экономического отдела производства изопрена ООО «СИБУР Тольятти».

Таблица 12 - Расчет по энергопотреблению

Наименование	Ед.изм.	2019	2020	2021	2022
До					
Потребление э/энергии	кВт/год	31896384	33312583	34715043	35169810
После					
Потребление э/энергии	кВт/год	27111926	28315696	29507786	29894338
Эффект					
Потребление э/энергии (экономия)	кВт/год	0	-4996887	-5207257	-5275472

Пары аммиака после поршневого компрессора загрязнены частицами пыли, влагой и маслом. Это приводит к замасливаю трубног пучка испарителя. Содержание масла в парах аммиака - 25мг/м<sup>3</sup>.

Тогда количество масла, попадающего в пары аммиака от поршневого компрессора4АГ, составит

$$25*3420/1000 = 85,5 \text{ г/час}$$

Пары аммиака после винтового компрессора более чистые.

Содержание масла в парах аммиака 3мг/м<sup>3</sup>.

Тогда количество масла, попадающего в воздух от винтового компрессорного агрегата ХСВ-2АGrassосерия SP1составит

$$3*4900/1000 = 14,7 \text{ г/час}$$

Снижение масла в парах аммиака

$$85,5 - 14,7 = 70,8 \text{ г/час}$$

В результате ухудшение теплообмена в испарителях от замасливания трубног пучка будет исключено. Отпадет необходимость прогрева аппаратов и освобождения их от масла. А значит повысится надежность работы компрессорной установки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенное техническое решение позволит снизить себестоимость производства изопрена и сделать его более экономически выгодным, а также за счет увеличения мощности по холодопроизводительности установки получения холода обеспечить дальнейшее наращивание мощности выпуска изопрена.

Дополнительно модернизация компрессорной установки позволяет решить проблему замасливания теплообменных поверхностей аппаратов холодильного контура. Это повышает надежность работы оборудования и снизить эксплуатационные затраты.

Работа решает актуальную техническую проблему, а предложенное решение имеет высокий потенциал промышленного внедрения.

Применение энергоэффективных решений повышает конкурентоспособность предприятия в целом.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Федеральный закон от 11 марта 2013 г. № 96 Об утверждении «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств»[Электронный ресурс]. – URL:<https://www.garant.ru/>(дата обращения 12.05.2019г).
2. Федеральный закон от 21.07.1997 N 116-ФЗ (ред. от 13.07.2015) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [Электронный ресурс]. – URL:<https://www.garant.ru/>(дата обращения 15.05.2019г).
- 3.Федеральный закон от 10 января 2002 г. N 7-ФЗ "Об охране окружающей среды"
4. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. М., 2014. – 51с.
5. Постоянный технологический регламент производства изопрена цеха И-3-9 ООО «СИБУР Тольятти» 2018. – Тольятти, 2018. – 45 с.
6. Аверко-Антонович, Л.А. Химия и технология синтетического каучука / Л.А. Аверко-Антонович. – М: Колос, 2015г – 356с.
7. Бахшалиев, Валех Механика Поршневых Машин / ВалехБахшалиев. - М.: LAP LambertAcademicPublishing, 2014г - 320с.
8. Винтовые компрессорные Агрегаты Grasso SP1 Серии Medium Руководство по эксплуатации (Перевод оригинального текста) P\_231526\_5. – 124с.
- 9.Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: В двух томах / Ю.И. Дытнерский. - М.: Альянс, 2015. - 368 с.
- 10.Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Массообменные процессы и аппараты. В 2 т. / Ю.И. Дытнерский. - М.: Альянс, 2016. - 368 с.



11. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: В двух томах 1 т / Ю.И. Дытнерский. - М.: Альянс, 2015. - 400 с.
12. Дытнерский, Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию: Учебное пособие для вузов / Ю.И. Дытнерский, Г.С. Борисов, В. Брыков. - М.: Альянс, 2015. - 496 с.
13. Генкин, А.Э. «Оборудование химических заводов». - М.: Энергоатоминзат, 2014. Т.1. -617 с. Т.2. -423 с.
14. Герасимов, Ю.Н. «Оборудование химических предприятий» - М.: Высшая школа, 2014. -423 с.
15. Давлетбаева, И.М., Григорьев Е.И. Химия и технология синтетического каучука К. КНИТУ, 2016 – 402 с.
16. Довлетбаева, И.М. Химия и технология синтетического каучука: учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений - М: изд. Колос Химия, 20015 г. – 398 с.
17. Дыкман, А.С., Бусыгин, В.М., Гильманов, Х.Х., Моисеев ,И. И., Федорцова, Е.В. Перспективы производства изопренового каучука//Экономика и управление. 2014. № 8. С. 29-35.
18. Дячек, П.И. Холодильные машины и установки. Ростов Н/Д: Феникс, 2017. – 423 с.
19. Дыкман, А.С., Шарифуллин, И.Г. Основные этапы развития производства изопренового каучука из изобутилена и формальдегида. – М: "Каучук и резина", 2017. – 123 с.
20. Журавлева, К.А., Назаров, А.А., Поникаров С.И Синтез изопрена из изобутилена и формальдегида. – Казань: КНИТУ, 2014. – 213 с.
21. Захаров, Б.С. Поршневые насосы для разработки нефтяных месторождений (Reciprocatingpumpsforoildevelopment) / Б.С. Захаров. - М.: ВНИИОЭНГ, 2016. - 105 с.
22. Захарова, А.Б. Процессы и аппараты химической технологии./проф. А. А. Захарова.: М. издат. центр «Академия», 2016. – 528 с.

23. Зенитова, Л.А., Аверьянов, Д.Н., Кочне, А.М., Галибеев, С.С. Оборудование производств синтетического каучука – Казань: КНИТУ, 2015 г. – 422 с.
- 24 . Исрафилов, Д.И., Мухаматдинов, И.А. Экология холодильных установок – Наука вчера, сегодня, завтра. Сборник статей, 2017г. -165 с.
25. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов / А.Г. Касаткин. - М.: Альянс, 2014. - 752 с.
26. Касьянова, Л.З., Даминов, Р.Р., Исламутдинова, А.А. Синтез изопрен-мономера методом двухстадийного дегидрирования изопентана. Уфа: ООО "Научно-исследовательский институт истории науки и техники", 2014 г. -214 с.
27. Кукушкин, О. А. Процессы и аппараты химической технологии/ Кукушкин О. А., Куров В. С., Бутко Г. Ю., Завьялов М. В.: Под ред. О. А. Кокушкина - СПб, 2015. – 527 с.
28. Лашутина, Н.Г., Верхов, Т.А., Суедов, В.П. Холодильные машины и установки – М.; КолоС, 2016. – 440с.
29. Липин, Е. С., Акимов, С. В., Панайотти, С. С. Химические консольные центробежные насосы. Калуга: Манускрипт, 2017. – 366 с.
30. Литвин, О. Б. Современный промышленный синтез изопрена/О. Б. Литвин. -М.: ЦНИИТЭНефтехим, 2014. -528 с.
31. Макаров, Ю.И. «Технологическое оборудование химических и нефтегазоперерабатывающих заводов» Л: ЛЕНИНГРАД, 2014. – 480 с.
32. Мифтахов, А.А. Курсовое проектирование по холодильным установкам: Учебное пособие/ Мифтахов А.А. – Казань: КГТУ, 2015. – 160 с.
33. Николаев, А. Б, Северененко, П. С, Лабораторные и практические занятия по неорганической и органической химии Пособие для студ. вузов. – 1-изд., М.: Дрофа, 2014. – 364 с.: ил.
34. Никольский, А.Б., Суворов, А.В. Химия, справочные данные органических веществ. - СПб., 2015. - 420 с

35. Общая химическая технология и основы промышленной экологии: учеб. для студ. вузов, обуч. по хим.-технол. спец. / ред. В. И. Ксензенко,. – 2-е изд., стер. – Москва: Колосс, 2015. – 328 с.
36. Овчинников, Г.А., Тухватшин, В.С., Горских, В.А., Талипов Р.Ф. Промышленные способы синтеза изопрена – Уфа: БГУ, 2016
37. ООО «СИБУР Тольятти»: [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sibur.ru/togliatti/> (дата обращения 13.05.2019г).
38. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – Л.: Химия, 2014. – 596 с.
39. Пластинин, П. И. Поршневые компрессоры. Том 1. Теория и расчет / П.И. Пластинин. - М.: Колос, 2014. - 456 с
40. Пластинин, П. И. Поршневые компрессоры. Том 2. Основы проектирования. Конструкции: моногр. / П.И. Пластинин. - М.: КолосС, 2018. - 720 с.
41. Поникаров, И.И., Поникаров, С.И., Рачковский, С.В. Расчеты машин и аппаратов химических производств и нефтепереработки (примеры и задачи): учебное пособие – М.: Альфа-М , 2014. – 720 с.
42. Промышленное холодильное оборудование GEA – [gea.com](http://gea.com)
43. Романов П.Г., Курочкина М.И., Мозжерин Ю.А., Смирнов Н.Н. Процессы и аппараты химической промышленности. - Ленинград: Химия, 2014 г. -499 с.
44. Сергиенко, А. Г. Общие понятия о химии: учебное пособие для вузов по спец. в области техники и технологии / В.В. Вольхин. – Спб.: Лань, 2015. – 440 с.
45. Соколова, А.В. Бережливое производство как инструмент ресурсосбережения в химическом производстве. – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2014. – 226 с.

46. Таранова, Л.В. Машины и аппараты химических производств. – Пенза: «Академия Естествознания», 2014. – 367 с.
47. Технологическая инструкция ТИ-И-30-20-16 по обслуживанию холодильного отделения установки газоразделения, получения изопрена ООО «СИБУР Тольятти».
48. Тимофеев, А. Н. Справочник химика: Т.1-6. - Л.: Химия, 2016.- 321 с.
49. Фирсова, Ю. А., Хамидуллин, М. С., Сайфетдинов, А.Г. Расчет аммиачной холодильной установки с закрытой системой охлаждения. Учебное пособие. - Казань: КГТУ, 2014 г. – 92с.
50. Цветков, А.Б. Холодильные агенты. – СПб,6 СПбГУНИПТ, 2014. – 216с.
51. Чалдаева, Д.А., Хусаинов, А.Д. Исторические предпосылки получения, производства и использования синтетического каучука. – Казань: КНИТУ Вестник Казанского университета
- 52.Чумак, И.Г., Чепурненко, В.П. и др. Холодильные установки. – М.: ВО. Агропромиздат, 2014. – 495 с.
53. Швиндин, А.И. Кавитация в насосах нефтеперерабатывающих производств. Проблемы и решения. – СПб: «МаркетСкипер», 2015
54. Шубин, В. С. Надежность оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств / В.С. Шубин, Ю.А. Рюмин. - М.: Химия, КолосС, 2016. – 360 с.
55. Эверет, Д. Введение в химическую термодинамику / Д. Эверет. - М.: Иностранная литература, 2014. - 300с.
56. Kulhavy, M, Cakl, J, Vaclavik, L, Marsalek, J. Electrodialysis as part of the integrated membrane process for landfill leachate treatment / M. Kulhavy, J. Cakl, L. Vaclavik, J. Marsalek // Desalination and water treatment – 2019. – Vol. № 150. – pp. 49-57 (датаобращения: 04.05.2019).

57. Rangreez, T. A., Mobin, R. Ion selective membrane electrodes as sensors for detection of heavy metal ions / T.A. Rangreez, R. Mobin // *Materials Research Foundations* – 2017. – pp. 86-186.

58. Ray, S. S. Developments in forward osmosis and membrane distillation for desalination of waters / S. S. Chen, D. Sangeetha, H. M. Chang, C. N. D. Thanh, Q. H. Le, H. M. Ku // *Environmental chemistry letters*, 2018. – pp. 1247-1265.

59. Rozhdestvenskaya, L. M., Dzyazko, Y. S., Kudelko, E. O., Vasilyuk, S. L., Belyakov, V. N. Desalination of Glycerol-Water Solutions by Electrodialysis Using the Organo-Inorganic Membranes / L. M. Rozhdestvenskaya, Y. S. Dzyazko, E. O. Kudelko, S. L. Vasilyuk, V. N. Belyakov // *Journal of water chemistry and technology* – 2017. – Vol. № 39. – pp. 26-32.

60. Seo, J. An optimization strategy for a forward osmosis-reverse osmosis hybrid process for wastewater reuse and seawater desalination: A modeling study / J. Seo, Y. M. Kim, S. H. Chae, S. J. Lim, H. Park, J. H. Kim // *Desalination* – 2019. – Vol. 463. – pp.40-49.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Поршневой компрессор 4АГ

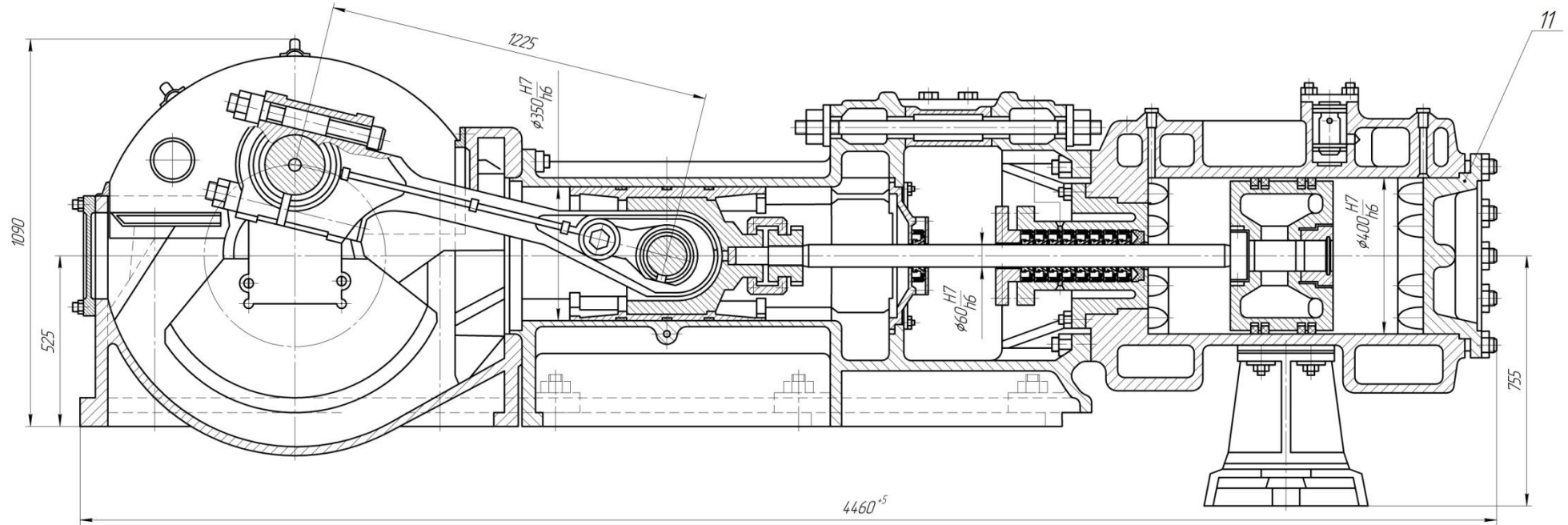


Рисунок А.1 - Поршневой компрессор 4АГ

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Винтовой компрессор

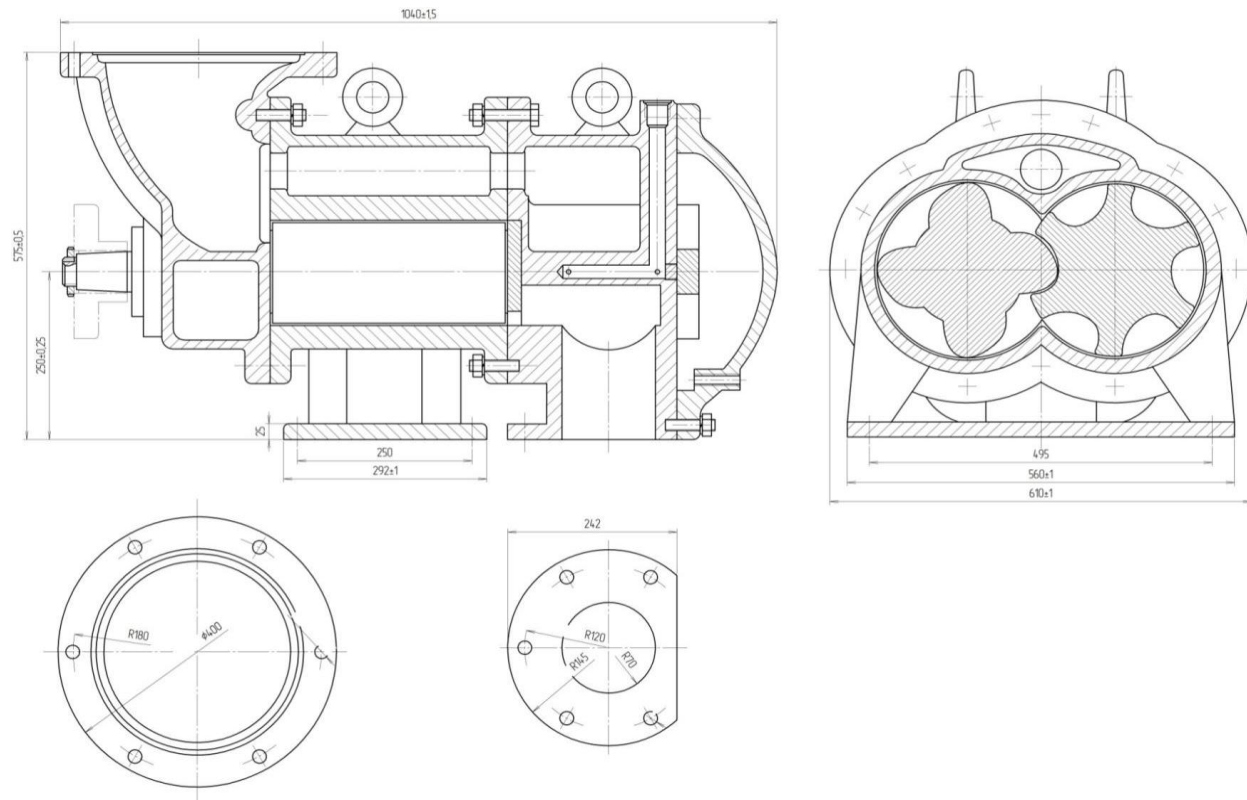


Рисунок Б.1 - Винтовой компрессор